Alakváltozás témaköre
Beton kúszása és ernyedése *(2003. december)*
Beton zsugorodása és repedése *(2007. szeptember)*
Rugalmassági modulusok *(2003. december)*

A beton kúszása és ernyedése

A kúszás és ernyedés reológiai fogalmak. A **reológia** görög eredetű szó, és ebben az értelmezésben az anyagoknak az idő folyamán lejátszódó változásait vizsgáló műszaki tudományág megnevezése.

A **kúszás** állandó hőmérsékleten, a tartós (időben változatlan) terhelőerő hatására fellépő, időben változó alakváltozás, amely kezdetben gyorsabban, később lassabban nő, míg évek múlva aszimptotához tart.

A kúszás ($\varepsilon_{kúszás}$) a terhelés okozta pillanatnyi alakváltozással (ε_0) és a zsugorodással (ε_{zs}) együtt a **tartós alakváltozást** (ε_t) teszi ki:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 + \varepsilon_{zs} + \varepsilon_{kúszás} \quad \text{és} \quad \varepsilon_{kúszás} = \varepsilon_t - \varepsilon_0 - \varepsilon_{zs}$$

A **beton lassú alakváltozása** ($\varepsilon_{lassú}$) a beton *zsugorodásának* és *kúszásának* együttes jelensége (*dr. Palotás László* professzor terminológiája):

$$\varepsilon_{lassú} = \varepsilon_{zs} + \varepsilon_{kúszás}$$

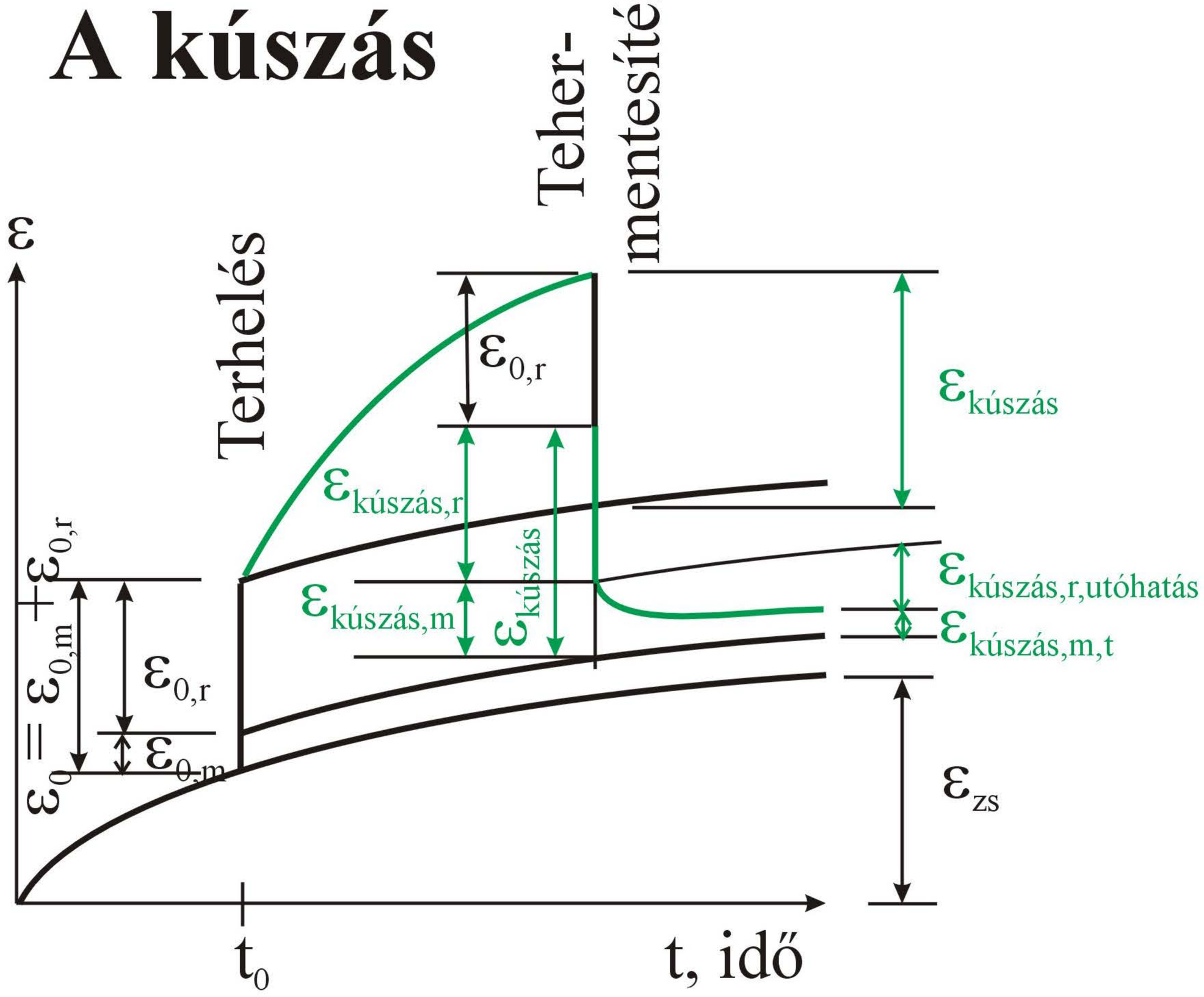
Meg kell jegyezni, hogy *dr. Balázs György* prof. emeritus a lassú alakváltozás kifejezést a kúszás szinonimájaként használja.

A következő ábrán a kúszás folyamata látható az idő függvényében. Ha a megterhelt betont bizonyos idő elteltével tehermentesítjük, akkor az nem nyeri vissza eredeti alakját, mert a tartós alakváltozás (ε_t) egy része maradó alakváltozás ($\varepsilon_{t,m}$), amely a zsugorodásból (ε_{zs}), a terhelés okozta pillanatnyi alakváltozás (ε_0) maradó részéből ($\varepsilon_{0,m}$) és a kúszás maradó alakváltozásából ($\varepsilon_{kúszás,m}$) tevődik össze:

$$\varepsilon_{t,m} = \varepsilon_{zs} + \varepsilon_{0,m} + \varepsilon_{kúszás,m}$$

Tehermentesítés után, az idő folyamán a kúszás maradó alakváltozásának egy része rugalmasan visszaalakul, - ezt a **kúszás rugalmas utóhatásának** nevezik ($\varepsilon_{kúszás,r,utóhatás}$) - ezért a tartós alakváltozás maradó részének végértéke:

$$\varepsilon_{t,m,\infty} = \varepsilon_{zs} + \varepsilon_{0,m} + \varepsilon_{kúszás,m} - \varepsilon_{kúszás,r,utóhatás}$$



A beton kúszását a méretezés során úgy vesszük figyelembe, hogy tartós terhelés esetén a kezdeti rugalmassági modulus (E_0) helyett az „ideális” rugalmassági modulussal (E_i) számolunk:

A kúszási tényező időbeli változását a következő összefüggés adja meg (MSZ 15022-1:1986):

$$\varphi_t = \varphi_\infty \left[1 - e^{-(t/w)^z} \right]$$

ahol:

φ_∞ = a kúszás végértéke

t = a teher felléptétől számított idő napokban

w = $1{,}8 * v_{ef} * z$

v_{ef} = a szerkezeti elem „hatásos vastagsága” mm-ben, amely általában a keresztmetszet kétszeres területének és párologni képes kerületének a hányadosa, kétoldalt párolgó szerkezet esetén annak vastagsága

z = $\sqrt{v_{ef}/1000}$

A közönséges (normál) beton kúszási tényezőjének tervezési végértékét az Eurocode-2 (BME Vasbetonszerkezetek Tanszéke: Oktatási segédlet, 1997. február) 3.3. táblázata a szerkezeti elem „hatásos vastagságától” (v_{ef}) függően (kisebb „hatásos vastagság”-hoz nagyobb kúszási tényező tartozik) például a következő határértékekkel adja meg:

Kúszási tényező végértéke, közelítő tervezési érték		
A beton kora a megterheléskor, t_0	Nedves környezet	Száraz környezet
28 nap	1,5 - 1,9	2,0 - 3,0
365 nap	1,0 - 1,1	1,2 - 1,8

A beton. illetve vasbeton szerkezetek erőtani tervezésével foglalkozó MSZ 15022/3:1986, illetve MSZ 15022/1:1986 szabványok például azt mondták ki, hogy a kúszási tényező közepes végértéke:

Beton nyomószilárdsági osztálya	Kúszási tényező közepes végértéke
C8/10	2,7
C16/20	2,1
C25/30	1,7
C35/45	1,4
C45/55	1,2

Az $1/(1+\varphi)$ tényező egynél kisebb szám, tehát a kúszás olyan folyamatnak tekinthető, mint amely a rugalmassági modulust csökkenti, például a hajlított tartók időbeni lehajlását növeli, így voltaképpen kedvezőtlen jelenség.

A kúszás elsősorban a cementkőben lejátszódó jelenség, mert az adalékanyag kúszása ($\varphi_{\text{kőanyag}} < 0{,}1$) a betonéhoz képest lényegében elhanyagolható.

A tervezési előírásokból és számítási képletekből is látszik, hogy a beton kúszását befolyásolja:

- a beton szerkezeti elem keresztmetszetének alakja;
- a terhelés kezdetének időpontja;
- a környezet relatív páratartalma;
- a friss beton konzisztenciája;

A beton. illetve vasbeton szerkezetek erőtani tervezésével foglalkozó MSZ 15022/3:1986, illetve MSZ 15022/1:1986 szabványok például azt mondták ki, hogy a kúszási tényező közepes végértéke:

Beton nyomószilárdsági osztálya	Kúszási tényező közepes végértéke
C8/10	2,7
C16/20	2,1
C25/30	1,7
C35/45	1,4
C45/55	1,2

Az $1/(1+\varphi)$ tényező egynél kisebb szám, tehát a kúszás olyan folyamatnak tekinthető, mint amely a rugalmassági modulust csökkenti, például a hajlított tartók időbeni lehajlását növeli, így voltaképpen kedvezőtlen jelenség.

A kúszás elsősorban a cementkőben lejátszódó jelenség, mert az adalékanyag kúszása ($\varphi_{\text{kőanyag}} < 0,1$) a betonéhoz képest lényegében elhanyagolható.

A tervezési előírásokból és számítási képletekből is látszik, hogy a beton kúszását befolyásolja:

- a beton szerkezeti elem keresztmetszetének alakja;
- a terhelés kezdetének időpontja;
- a környezet relatív páratartalma;
- a friss beton konzisztenciája;

- a megszilárdult beton szilárdsága stb.

A kúszás az egyébként is ajánlott szilárdságnövelő intézkedésekkel csökkenthető:

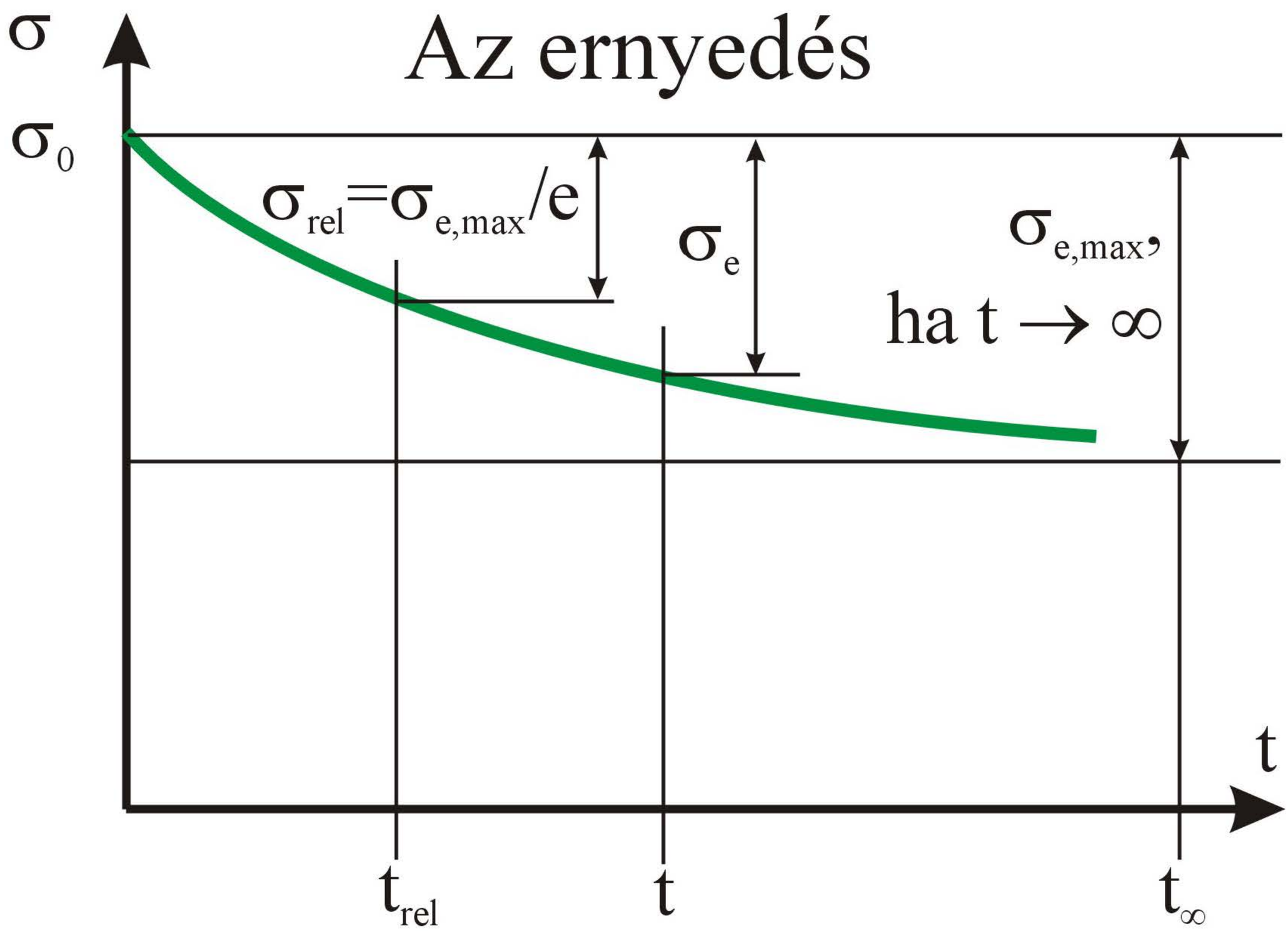
- nagyobb szilárdságú cement;
- jó minőségű adalékanyag;
- kevés keverő víz;
- jó bedolgozás;
- gondos és hosszú idejű nedves utókezelés;
- késői kizsaluzás stb.

A **kúszási határ** a kúszásnak (vagy a lassú alakváltozásnak, amely esetben „lassú alakváltozási határ”-nak nevezik) az a végtelen hosszú időhöz tartozó legnagyobb értéke, amelyet állandó terhelő mellett az anyag éppen törés nélkül viselni képes. A kúszási határhoz tartozó feszültség a **tartós szilárdság.**

A beton **tartós szilárdsága** az az állandó terhelőerő okozta legnagyobb feszültség, amelyet a beton végtelen hosszú ideig törésmentesen elbír. *Palotás professzor* megfogalmazásában: „a tartós szilárdság az a tartós terhelőfeszültség, amely mellett az anyag alakváltozási kapacitása kimerül”.

Az **ernyedés** (σ_e), más szóval **relaxáció** tulajdonképpen a kúszás inverze, „megfordítottja”. Azt a feszültség csökkenést (ernyedést) jelenti, amely az alakváltozás állandó értéken tartásához szükséges.

Azt az időt, amely alatt az ernyedés végértékének ($\sigma_{e,max}$) bizonyos hányada (σ_{rel}) bekövetkezik, **ernyedési (relaxációs) időnek** (t_{rel}) hívják. Ennek értéke igen nagy szám.



A beton kúszásának vizsgálata
'03 03 07

Aszfalt kúszás vizsgáló berendezés

Vissza

2. A beton zsugorodása

2.1. Általános megállapítások

A beton zsugorodása az alakváltozások, azon belül a külső terhelés nélkül létrejövő alakváltozások csoportjába tartozik.

A szilárduló betonokban a cementpép/cementkő a hidratáció, a száradás és egyéb belső átalakulások hatására, kémiai és fizikai folyamatok következtében zsugorodik. Ezt befolyásolja az adalékanyag-váz anyaga és állapota. Különleges esetekben az adalékanyag is zsugorodhat, illetve kerülhet olyan kiegészítő vagy adalékanyag a betonkeverékbe (kifejezetten a zsugorodás csökkentése érdekében), amely duzzad.

Ha a zsugorodás gátolt és az általa ébresztett húzófeszültség eléri a kötés és szilárdulás folyamatában lévő beton húzószilárdságát, akkor a beton megreped.

A beton zsugorodása általában, de különösen a vízzáró betonok és a látszóbetonok esetén okozhat statikai, illetve tartóssági problémákat.

Külső terheléstől független alakváltozásokat (zsugorodás, duzzadás) a beton nedvességtartalmának változása vagy a hőmérsékletváltozás ébreszti. Kedvezőtlen betonösszetétel esetén térfogat növekedéssel járó kémiai reakciók is lejátszódhatnak (duzzadás).

A *duzzadás* vízfelvétel okozta térfogatnövekedés. A kizsaluzás után víz alatt tárolt cementkő duzzadása $\varepsilon_{s\infty} \approx 1$ mm/m. A beton duzzadása – a zsugorodáshoz hasonlóan – mintegy egyötöde a cementkő duzzadásának. A beton szerkezeti elemek duzzadási alakváltozása általában 0,1 – 0,2 mm/m-re tehető. Az első kiszáradás után nagyobb a duzzadás, mint az ismételt vízfelvétel és kiszáradás után. A duzzadás a kiszáradási zsugorodásnak mintegy 40 – 80 %-a.

2.2. A zsugorodás fogalma [*Kausay*, 2009], [*Sárosi*, 2007]

A zsugorodás a víz leadás okozta alakváltozás.

A cementkötésű anyagok a cementkő pórusai vízháztartásának változása folytán változtatják térfogatukat. A kiszáradás zsugorodással, a vízfelvétel

duzzadással jár. A nedvességtartalom változás a kapillárisokban történő vízszállítás vagy diffúzió következménye. A zsugorodás és a duzzadás általában lineáris, egyváltozós összefüggéssel írható le.

Adott környezeti feltételek és szerkezeti elem méretek esetén a beton zsugorodása a beton összetételétől, a cementkő térfogatától, az adalékanyag szemek rugalmassági modulusától, valamint a cementkő és adalékanyag közötti kötéstől függ. Ha ezek a befolyásoló tényezők azonosak, akkor 0,4 – 0,6 közötti víz-cement tényező esetén a zsugorodás azonos.

A zsugorodásnak öt fajtáját szokás megkülönböztetni: kapilláris (korai), kémiai, autogén, karbonátosodási és száradási zsugorodás.

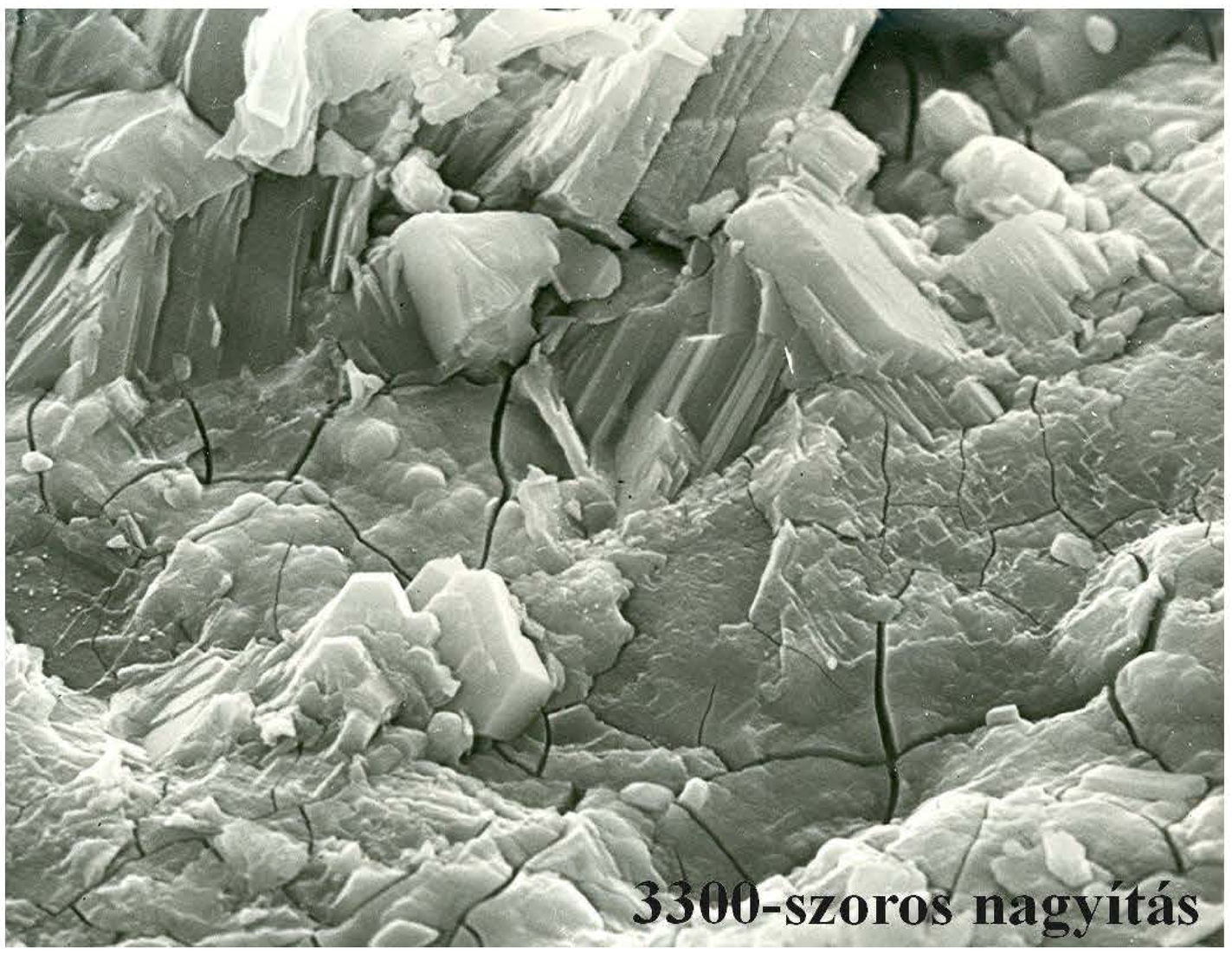
A ***kapilláris zsugorodás*** (korai zsugorodás, képlékeny zsugorodás) a friss betonban a kapilláris erők hatására alakul ki, amikor például a nedvszívó adalékanyag a vizet a friss, még képlékeny betonból elszívja, vagy amikor a víz a friss beton felületén elpárolog. A képlékeny zsugorodás – az utókezeletlen betonban – 4 mm/m értéket is elérheti. Ha a „zöld beton" már nem képlékeny, a kapilláris zsugorodás megszűnik. A kapilláris zsugorodás következtében a felületre merőleges, akár több cm mély repedések keletkezhetnek.

A korai zsugorodás a beton friss, még képlékeny állapotában lép fel. Ez a korai zsugorodás kapillárisokat hoz létre. A bedolgozott beton egy kezdeti rövid időszakban általában duzzad, de amikor a felületéről a vízfilm eltűnik, akkor elkezd zsugorodni. A korai zsugorodás gyors, rövid folyamat, a kötési idő végén véget ér, ez általában az első 8 óra. A keletkező repedések felületi hajszálrepedések, tágasságuk 1-2 mm-t is elérheti, kedvezőtlen klimatikus viszonyok mellett összértékük 4mm/m is lehet, de mélységük a felületi zónára korlátozódik. A felületi zóna húzott, a keresztmetszet belseje nyomott.

A ***kémiai zsugorodás*** a cement hidratációjának a következménye, amely abszolút térfogatcsökkenéssel jár. A kémiai zsugorodás azért lép fel, mert a keverő víz egy részét a hidratáció során a klinker ásványok kémiailag megkötik, és a keletkező cementpép térfogata a cement és víz térfogatánál kisebb. A hidratáció folyamán tehát térfogatcsökkenés lép fel, mert a vízmolekulák beépülnek a hidratációs termékbe, azaz a cement

a keverővíz egy részét kémiailag megköti. A megkötött víz általában a cement tömegének 22-28 %-a. A „maradék” vízből pórusvíz képződik, és a betonban marad vagy elpárolog. A kémiai zsugorodás okozta térfogatcsökkenés a teljes hidratáció után – amely $x \geq 0{,}4$ víz-cement tényezőt feltételez – mintegy 8 térfogat%.

A vízzel való keverést követően kialakuló kalciumhidroxid-kalciumszilikát-kalciumaluminát gélrendszerből szilárd kristályos hidráttermékek válnak ki, és összefüggő vázszerkezetet alkotva kialakul a szilárd cementkő (*2.1. ábra*). A hidratáció a cementszemcse külső felületén létrejövő gélrétegben indul, és halad fokozatosan a szemcse belseje felé. A cementszemcséknek csak egy vékony, néhány mikrométer (10-15 μm) vastagságú felületi rétege hidratálódik. Minél finomabb őrlésű a cement, annál nagyobb az egységnyi cementtömegre eső felület (fajlagos felület), következésképpen nagyobb a vízzel érintkező és így a hidratációban résztvevő klinkerásványok részaránya, és bizonyos határig a cement kialakuló kötőereje, szilárdsága. A hidratációs termékek kialakulásához víz és hely kell, ezért, ha a víz-cement tényező kisebb, mint 0,32-0,36, akkor kellő mennyiségű víz és kapilláris pórus hiányában *gátolt hidratáció* lép fel. [*Palotás,* 1979]



2.1. ábra: Portlandcementkő elektronmikroszkópi felvétele

A gélréteg kezdetben duzzad, majd vízvesztés közben a cementkővé szilárduló cementpép (cement + víz) zsugorodik. Ha a zsugorodás folytán ébredő húzóerő a még csak kialakulóban lévő húzószilárdságot meghaladja, akkor a cementkő összerepedezik. A zsugorodás mértéke és a vele járó repedésképződés veszélye a száradás megakadályozásával, a beton gondos utókezelésével csökkenthető.

A hidratáció hőfejlődéssel járó, exoterm folyamat, a fejlődött hő a hidratációhő, amelynek mennyisége a cement összetételétől függ. A klinkerásványok közül legkisebb a dikalcium-szilikát és legnagyobb a trikalcium-aluminát hidratációhője és *zsugorodása*. Az aluminátcementek hidratációhője és *zsugorodása* a portlandcementekénél nagyobb. A cement kiegészítő anyagok csökkentik a portlandcementek hidratációhőjét. Nyári betonozásnál és különösen tömegbetonok esetén fontos a mérsékelt hőfejlesztésű cementek alkalmazása, mert a nagy hőfejlesztésű cementek nyáron a beton szilárdulási ütemét gyorsítják, konzisztenciáját szárazabbá teszik, vízigényét megnövelik, a tömegbetonok esetén pedig egyenetlen keresztmetszeti felmelegedést okoznak, húzófeszültségeket ébresztenek, és mindkét esetben a beton *zsugorodását* és repedésérzékenységét növelik.

Adam-nál (2006) olvashatjuk, hogy *Powers* és *Brownyard* (1947-1948) szerint 1 g cement legfeljebb $M_{v,n} = 0{,}23$ g el nem gőzölhető vizet ❖ köt meg (víz-cement tényezővel kifejezve $x_{\text{el nem gőzölhető}} = 0{,}23$). *Ez kevesebb, mint a teljes hidratációhoz szükséges víz, amely mint látni fogjuk 1 g cementre vetítve* $x_{0,min} = 0{,}36$ *g, illetve* $x_{0,min}' = 0{,}42$. Ha az el nem gőzölhető víz sűrűsége nagyobb a kapilláris víz sűrűségénél ($\rho_{v,szabad} = 1{,}00$ g/cm^3) és értéke $\rho_{v,n} = 1{,}35$ g/cm^3, akkor ennek reciproka az el nem gőzölhető víz fajlagos térfogata: $v_{v,n} = 0{,}74$ cm^3/g. Ha a cement sűrűsége $\rho_c = 3{,}125$ g/cm^3, akkor ennek reciproka a cement fajlagos térfogata: $v_c = 0{,}32$ cm^3/g. Teljes hidratáció esetén az 1 g cementkőben lévő el nem gőzölhető víz térfogata:

$$V_{v,n} = M_{v,n} \cdot v_{v,n} = 0{,}23 \cdot 0{,}74 = 0{,}17 \text{ cm}^3/\text{g}$$

Az 1 g cementből képződő hidratációs szilárd fázis térfogata a cement térfogatának és az el nem gőzölhető víz térfogatának az összege:

$$V_{hc} = V_c + V_{v,n} = 0{,}32 + 0{,}17 = 0{,}49 \text{ cm}^3/\text{g}$$

Ha 1 g cementből 0,49 cm^3/g hidratációs szilárd fázis képződik, akkor 1 cm^3 cementből képződő szilárd fázis térfogata V_{hc}/v_c = 0,49/0,32 =1,531 cm^3/cm^3.

(Fel kell hívni a figyelmet arra, hogy a német szakirodalomban előfordul, hogy a szilárd fázist nevezik cementgélnek → Zementgel.)

A cement hidratációs termékeinek összege alkotja a szilárd fázist és a cementgélt. A hidratációs cementgél gélpórusokat tartalmaz. Olykor a cementgélt egyszerűen gélpórusnak nevezik, értve alatta a pórusos cementgélt. (A gélpórusok átmérője kisebb, mint 0,01 μm, de feltétlenül kisebb, mint 0,1 μm; a pórusméretek megadása szerzőnként eltérő lehet). A cementkő térfogata a szilárd fázis és a gélpórusokat tartalmazó cementgél térfogatának összege. (Ha a vízadagolás, illetve víztartalom nem nagyobb, mint amennyi víz a teljes hidratációhoz szükséges, és az el sem tud párologni, akkor $V_{\text{kapilláris}}$ kapilláris pórusok nem keletkeznek, illetve nem törvényszerű, hogy keletkezzenek. Ezeket a kapilláris pórusokat nem szabad összetéveszteni a $V_{\text{zsugorodási}}$ zsugorodási pórusokkal.)

A modellalkotók feltételezték továbbá, hogy a 1 cm^3 cementkő kb. v_{GP} = 0,28 cm^3 cementgélből és (1 - v_{GP}) = 0,72 cm^3 hidratációs termékből áll. Ha 1 cm^3 cementből V_{hc}/v_c = 1,531 cm^3/cm^3 hidratációs termék (cementgél) keletkezik, és ez a cementkő térfogatának (1 - v_{GP}) = 0,72 része, akkor az 1 cm^3 cementből képződő cementkő térfogata (X):

$$X = \frac{V_{hc}/v_c}{1-v_{GP}} = \frac{V_{hc}}{v_c\cdot(1-v_{GP})} = \frac{V_c + V_{v,n}}{v_c\cdot(1-v_{GP})} = \frac{0{,}32+0{,}17}{0{,}32\cdot(1-0{,}28)} = \frac{1{,}531}{0{,}72} = 2{,}126 \quad cm^3/cm^3$$

Tehát 1 cm^3 cement teljes hidratációja során a keletkező cementkő (cementgél + gélpórus) térfogata 2,126 cm^3. Ha feltételezzük, hogy a keletkező cementkő térfogata a hidratációs fokkal arányos, akkor az előbbi összefüggés a *hidratációs fok* (α) függvényében (teljes hidratáció esetén $\alpha = \alpha_\infty = 1$) a következő alakot ölti:

$$X_\alpha = \frac{\alpha\cdot V_{hc}/v_c}{1-\alpha\cdot v_{GP}} = \frac{\alpha\cdot V_{hc}}{v_c\cdot(1-\alpha\cdot v_{GP})} \quad cm^3/cm^3$$

Ha 1 cm^3 cement teljes hidratációjából X = 2,126 cm^3/cm^3 térfogatú cementkő képződik, akkor 1 g tömegű cementből $X/\rho_c = v_c\cdot X = 0{,}32\cdot 2{,}126$ = 0,68 cm^3/g térfogatú cementkő lesz. Az 1 g tömegű cement teljes hidratációhoz szükséges víz mennyisége az 1 g tömegű cementből

keletkező cementkő térfogatának és az 1 g tömegű cement térfogatának különbségeként írható fel, és a teljes hidratációhoz szükséges minimális víz-cement tényezőként ($x_{0,\ min}$) értelmezhető, ha a próbatestet az utókezelés alatt többlet vízhez juthat:

$$x_{0,min} = v_c \cdot X - v_c = v_c \cdot (X - 1) = 0{,}68 - 0{,}32 \equiv 0{,}32 \cdot (2{,}126 - 1) = 0{,}36 \text{ g/g}$$

A kémiai zsugorodás folytán a hidratáció során zsugorodási pórusok ($V_{zsugorodási}$) jönnek létre. Ha teljes hidratáció esetén az 1 g cement által megkötött, el nem gőzölhető víz tömege $M_{v,n} = 0{,}23$ g/g, akkor ennek a víznek a térfogata keverővíz alakjában $V_{v,szabad} = M_{v,n}/\rho_{v,szabad} = 0{,}23/1{,}00 = 0{,}23$ cm^3/g, és el nem gőzölt víz alakjában $V_{v,n} = M_{v,n}/\rho_{v,n} = 0{,}23/1{,}35 = 0{,}17$ cm^3/g. Az 1 g tömegű cement teljes hidratációja esetén létrejövő $V_{zsugorodási}$ zsugorodási pórusok térfogata a hidratációhoz szükséges el nem gőzölt víz térfogat-csökkenéséből adódik:

$$V_{zsugorodási} = V_{v,szabad} - V_{v,n} = (M_{v,n}/\rho_{v,szabad}) - (M_{v,n}/\rho_{v,n}) = M_{v.n} \cdot \{(1/ v_{v,szabad}) - (1/ v_{v,n})\} = 0{,}23 - 0{,}17 \equiv 0{,}23/1{,}00 - 0{,}23/1{,}35 = 0{,}23 \cdot (1{,}00 - 0{,}74) = 0{,}23 \cdot 0{,}26 = 0{,}06 \text{ cm}^3\text{/g}$$

Ha 1 g tömegű cement teljes hidratációjakor $V_{zsugorodási,M} = 0{,}06$ cm^3/g térfogatú zsugorodási pórusok keletkeznek, akkor ezeknek a pórusoknak a térfogata 1 cm^3 térfogatú cementre vetítve: $V_{zsugorodási,V} = \rho_c \cdot V_{zsugorodási,M} = 3{,}125 \cdot 0{,}06 = 0{,}188$ cm^3/cm^3.

A vízfelszívástól és párologtatástól fóliatakarással védett („konzervált”) próbatest zsugorodási pórusai levegővel telnek meg. Ha azonban a próbatestet víz alatt tárolják, akkor próbatest zsugorodási pórusai vizet szívnak fel. Ha a víz alatt tárolt próbatest a teljes hidratációhoz szükségesnél ($x_{0,min}' = 0{,}42$) kisebb x_0 víz-cement tényezővel készült, akkor a pótlólagosan felszívott víz a készítéskori kis víz-cement tényező ($x_0 < x_{0,min}'$) ellenére lehetővé teheti a teljes hidratációt. A teória szerint ebben az esetben az 1 cm^3 cementből képződő cementkő térfogata nem X, hanem $V_{zsugorodási,V}$ térfogattal több:

$$X' = X + V_{zsugorodási,V} = X + \rho_c \cdot V_{zsugorodási,M} = 2{,}126 + 3{,}125 \cdot 0{,}06 = 2{,}126 + 0{,}188 = 2{,}314 \text{ cm}^3\text{/ cm}^3$$

A nagyobb térfogatú cementkő kialakulásához teljes hidratáció esetén nem $x_{0,min}$, hanem $x_{0,min}'$ víz mennyiségre van szükség, amit úgy kapunk meg, hogy az $x_{0,min}$ fenti összefüggésébe X helyett X'-t írunk:

$x_{0,\min}' = v_c \cdot X' - v_c = v_c \cdot (X' - 1) = v_c \cdot (X + V_{\text{zsugorodási,V}} - 1) =$
$= 0{,}32 \cdot (2{,}126 + 0{,}188 - 1) = 0{,}36 + 0{,}06 = 0{,}42$ g/g

Tehát víz alatt tárolt próbatest esetén az 1 g tömegű cement teljes hidratációhoz felhasznált víz mennyisége, más szóval a teljes hidratációhoz szükséges minimális víz-cement tényező értéke $x_{0,\min}' = 0{,}42$.

Ha a hidratáció nem teljes, akkor a hidratációs fokhoz ($\alpha \leq 1{,}0$) tartozó víz-cement tényező:

$$x_{0,\min,\alpha}' = \alpha \cdot x_{0,\min}' = \alpha \cdot v_c \cdot (X' - 1) = \alpha \cdot 0{,}42 \leq x_{0,\min}'$$

és az alkalmazott $x_0 \leq x_{0,\min}'$ víz-cement tényezőhöz tartozó hidratációs fok:

$$\alpha = \frac{x_{0,\min,\alpha}'}{v_c \cdot (X' - 1)} = \frac{x_{0,\min,\alpha}'}{0{,}42} \rightarrow \frac{x_0}{0{,}42}$$

Az $x_{0,\min}' = 0{,}42$ értéknél kisebb víz-cement tényezővel (x_0') készült és elegendő pótlólagos vízhez (1,0 g cement esetén: $x_{0,\min}' - x_0$) nem jutó cementkő hidratációja nem lehet teljes. Az $x_0 < x_{0,\min}' = 0{,}42$ víz-cement tényezővel készült és víz alatt tárolt, de elegendő pótlólagos vízhez még sem jutó cementkő hidratációs foka ($\alpha' \leq 1{,}0$) az

$x_0 = \alpha' \cdot x_{0,\min}' = \alpha' \cdot (v_c \cdot X' - v_c) = \alpha' \cdot v_c \cdot (X + V_{\text{zsugorodási,V}} - 1) = = \alpha' \cdot 0{,}42 \leq 0{,}42$

összefüggésből legfeljebb:

$$\alpha' = \frac{x_{0,\min,\alpha}'}{v_c \cdot (X + V_{zsugorodási,V} - 1)} = \frac{x_{0,\min,\alpha}'}{0{,}42} \rightarrow \frac{x_0'}{0{,}42}$$

Ha a hidratáció alatt a teljes hidratációhoz szükséges vízből elpárolog, akkor levegő tartalmú kapilláris pórusok maradnak vissza. Ha az alkalmazott x_0 víz-cement tényező a hidratáció α fokához szükségesnél nagyobb ($x_0 > \alpha \cdot x_{0,\min}'$), akkor törvényszerű a $V_{\text{kapilláris}}$ fajlagos térfogatú kapilláris pórusok keletkezése, mert az (x_0 - $\alpha \cdot x_{0,\min}'$) vízfelesleg el fog párologni. {A kapilláris pórusok átmérője nagyobb, mint 0,01 μm, de feltétlenül nagyobb, mint 0,1 μm és kisebb, mint 40 μm, de feltétlenül kisebb, mint 150 μm (a pórusméretek megadása szerzőnként eltérő lehet)}. A kapilláris pórusok fajlagos térfogatát cm^3/cm^3 mértékegységben az 1 g cementre vetített (x_0 - $\alpha \cdot x_{0,\min}'$) cm^3/g térfogatú

vízfeleslegnek és a cement és keverővíz térfogatösszegének ($v_c + x_0$) cm^3/g a hányadosa adja:

$$V_{kapilláris} = \frac{x_0 - \alpha \cdot x_{0,\min}'}{v_c + x_0} = \frac{x_0 - \alpha \cdot v_c \cdot (X' - 1)}{v_c + x_0} = \frac{x_0 - \alpha \cdot 0{,}42}{0{,}32 + x_0} \quad cm^3 / cm^3$$

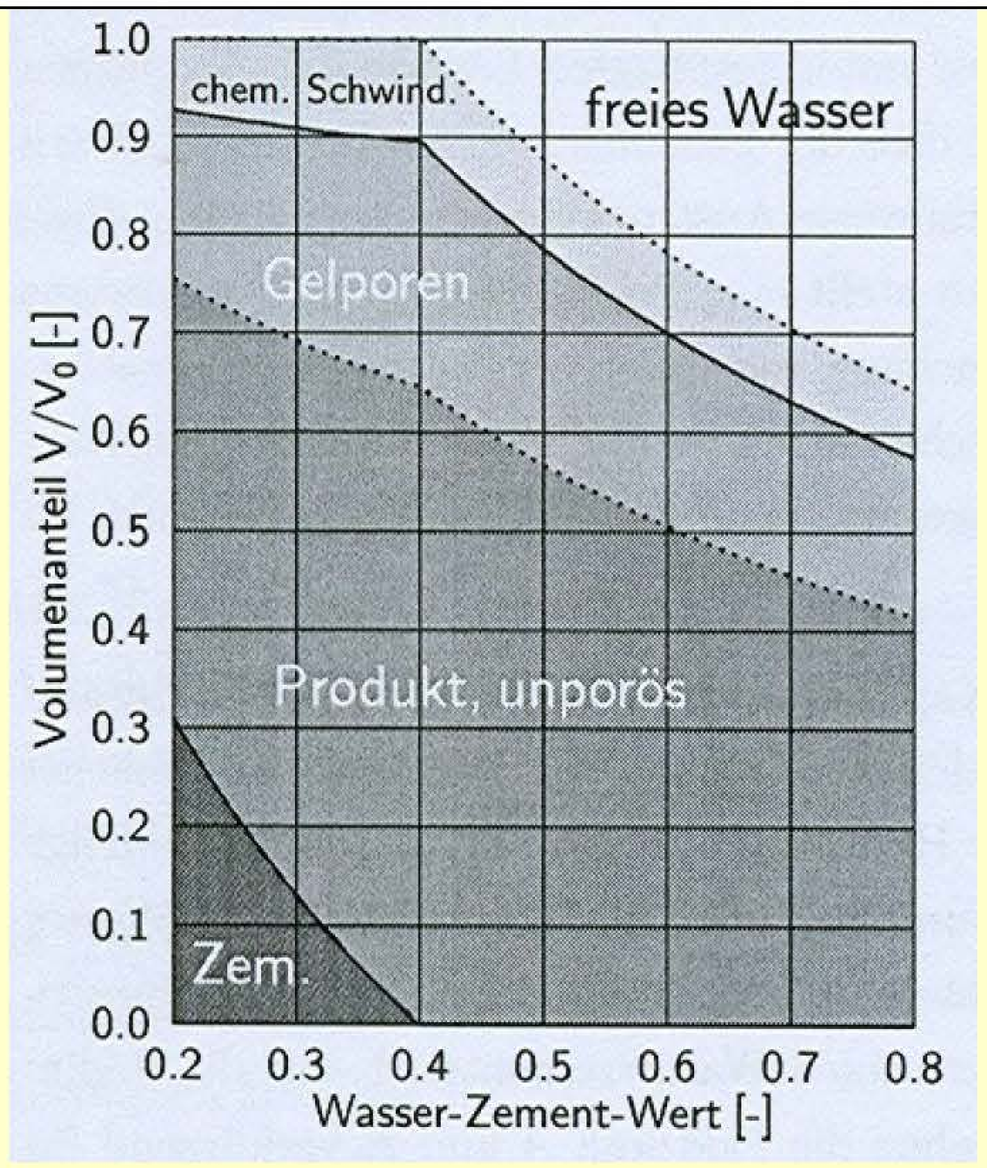
Ha a cementkő 1 cm^3 térfogatából levonjuk a kapilláris pórusok fajlagos térfogatát, akkor a cementkő tömörségét (mértékegység nélkül) kapjuk:

$$t = 1 - V_{kapilláris} = 1 - \frac{x_0 - \alpha.0{,}42}{0{,}32 + x_0} = 1 - \frac{3{,}125 \cdot x_0 - 1{,}3125 \cdot \alpha}{1 + 3{,}125 \cdot x_0} = \frac{1 + 1{,}3125 \cdot \alpha}{1 + 3{,}125 \cdot x_0}$$

A cementkő porozitása (mértékegység nélkül):

$$p = 1 - t = V_{\text{kapilláris}}$$

A teljesen hidratált cementkő pórusarányai a hidratációhoz rendelkezésre álló víz-cement tényező függvényében a *2.2.* és a *2.3. ábrán* láthatók.



Produkt, unporös = Szilárd, tömör hidratációs termékek

Zem. = Hidratálatlan cement szemek

Forrás: *Nothnagel*, 2007.

2.2. ábra: Teljesen hidratált cementkő pórusarányai a hidratációhoz rendelkezésre álló víz-cement tényező függvényében, ha a próbatest a vízforgalomtól el van zárva

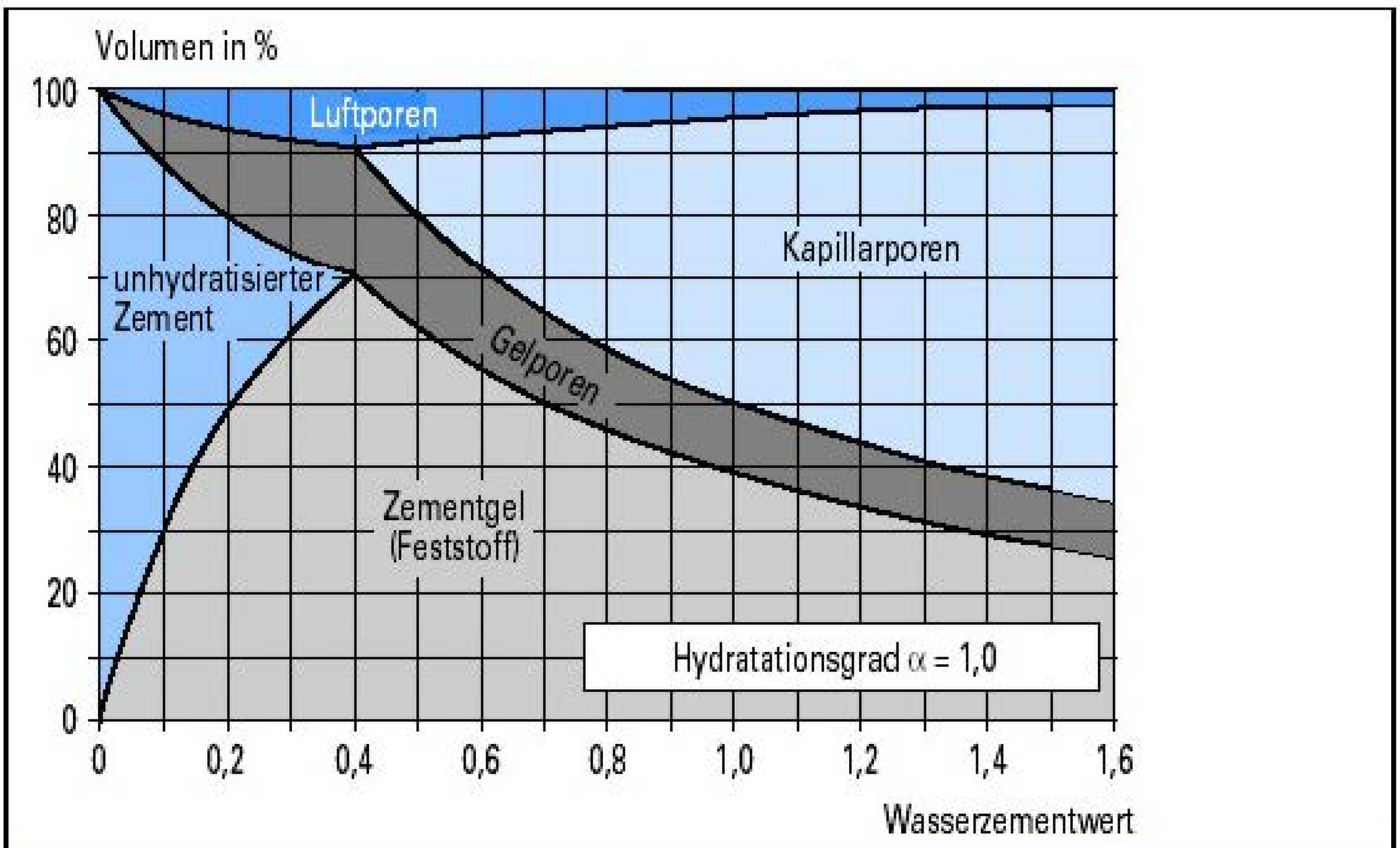
Wasser-Zement-Wert = Víz-cement tényező

Volumenanteil = Térfogatarány

Freies Wasser = Szabad víz, azaz kapilláris pórusok

Chem. Schwind. = Kémiai zsugorodás

Gelporen = Porózus gél



2.3. ábra: Teljesen hidratált cementkő pórusarányai a hidratációhoz rendelkezésre álló víz-cement tényező függvényében, ha a próbatest a vízforgalomtól el van zárva

Wasserzementwert = Víz-cement tényező
Volumen in % = Térfogatarány
Luftporen = Légpórusok
Kapillarporen = Kapilláris pórusok
Gelporen = Gél pórusok
Zementgel (Feststoff) = Szilárd, tömör hidratációs termékek
Unhydratisierter Zement = Hidratálatlan cement szemek
Hydratationsgrad = Hidratációs fok
Forrás: Zement Taschenbuch, 2008.

A cement hidratáció *Powers* és *Brownyard* féle modelljének fenn ismertetett verziója *Adam* (2006) akadémiai doktori értekezésében található. Az értekezést olvasva lépésről lépésre követhető a modell-alkotó cement kutatók gondolkodás módja. A modell főbb elveit és a számítások eredményét hasznos lehet összefoglalni:

- A cementkő térfogata a teljes hidratáció állapotában kapilláris pórusokat nem tartalmaz, hanem a szilárd fázis és a gélpórusokat tartalmazó cementgél térfogatának összege.
- A cement teljes hidratációjában el nem gőzölhető és elgőzölhető víz is részt vesz, következésképpen a gélpórusokban elgőzölhető víz is van.
- Az el nem gőzölhető víz sűrűsége a belső nyomás folytán $\rho_{v,n} = 1{,}35$ g/cm^3, tehát 1 g = 1 cm^3 térfogatú keverővíz fajlagos térfogata a cementkőbe beépülve $v_{v,n} = 1/1{,}35 = 0{,}74$ cm^3/g lesz. E tekintetben nem tesznek különbséget az el nem gőzölhető víz és a gélvíz között.
- 1 g cement legfeljebb $M_{v,n} = 0{,}23$ g/g el nem gőzölhető vizet köt meg (víz-cement tényezővel kifejezve $x_{\text{el nem gőzölhető}} = 0{,}23$). Ez kevesebb, mint a teljes hidratációhoz szükséges víz, amely 1 g cementre vetítve $x_{0,min} = 0{,}36$ g/g, ha a próbatestet az utókezelés alatt vízhez jut.
- 1 g cement által teljes hidratáció során megkötött el nem gőzölhető víz térfogata a cementkőben $V_{wn} = 0{,}17$ cm^3/g.
- 1 g cementből teljes hidratáció során képződő hidratációs szilárd fázis térfogata $V_{hc} = 0{,}49$ cm^3/g.
- 1 cm^3 cementből teljes hidratáció során képződő hidratációs szilárd fázis térfogata $V_{hc}/v_c = 1{,}53$ cm^3/cm^3.
- 1 cm^3 cement teljes hidratációjából képződő cementkő (szilárd fázis + cementgél) térfogata $X = 2{,}13$ cm^3/cm^3.
- A teljes hidratációhoz szükséges minimális készítési víz-cement tényező – ha a próbatestet az utókezelés alatt vízhez jut – $x_{0,min} = 0{,}36$.
- 1 g tömegű cement teljes hidratációjakor $V_{\text{zsugorodási,M}} = 0{,}06$ cm^3/g térfogatú zsugorodási pórus keletkezik. Ezeknek a pórusoknak a térfogata 1 cm^3 térfogatú cementre vetítve: $V_{\text{zsugorodási,V}} = \rho_c \cdot V_{\text{zsugorodási,M}} = 3{,}125 \cdot 0{,}06 = 0{,}188$ cm^3/cm^3.
- A vízfelszívástól és párologtatástól fóliatakarással védett („konzervált”) próbatest zsugorodási pórusai levegővel telnek meg. Ha azonban a próbatestet víz alatt tárolják, akkor próbatest zsugorodási pórusai vizet szívnak fel. Víz alatt tárolt próbatest esetén az 1 g

tömegű cement teljes hidratációhoz szükséges víz mennyisége $x_{0,min}' = x_{0,min} ++ V_{zsugorodási,M} = 0,36 + 0,06 = 0,42$ g/g, más szóval a teljes hidratációhoz szükséges minimális víz-cement tényező értéke $x_{0,min}' = 0,42$.

- Ha a víz alatt tárolt próbatest a teljes hidratációhoz szükségesnél ($x_{0,min}' = 0,42$) kisebb x_0 víz-cement tényezővel készült, akkor a pótlólagosan felszívott víz a készítéskori kis víz-cement tényező ($x_0 < x_{0,min}'$) ellenére lehetővé teheti a teljes hidratációt. A teória szerint ebben az esetben az 1 cm^3 cementből képződő cementkő térfogata $X' = 2,31$ cm^3/cm^3.
- Ha az alkalmazott x_0 víz-cement tényező a hidratáció α fokához szükségesnél nagyobb ($x_0 > \alpha \cdot x_{0,min}'$), akkor törvényszerű a $V_{kapilláris}$ fajlagos térfogatú kapilláris pórusok keletkezése, mert az ($x_0 - \alpha \cdot x_{0,min}'$) vízfelesleg el fog párologni.
- Teljes hidratációhoz szükséges víz mennyisége a cementnek megközelítőleg mintegy 40 – 42 tömeg%-a (víz-cement tényezővel kifejezve: $x = 0,40$ vagy $0,42$). E cementkő víztartalma pl. $100 \cdot 0,42/(1+0,42) = 29,6$ tömeg%. A teljesen hidratált cementkő a cementre vetítve mintegy 25 – 26 tömeg% ($x_k = 0,25$ vagy $0,26$) kémiailag (szerkezetileg) kötött, ún. el nem gőzölhető vizet tartalmaz (az ilyen cementkő kémiailag kötött víztartalma pl. $100 \cdot 0,26/(1+0,26) = 20,6$ tömeg%), míg a víz másik része a fizikailag kötött, elgőzölhető víz (pórusvíz) 15 – 16 tömeg% ($x_f = 0,15$ vagy $0,16$). E cementkő fizikailag kötött víztartalma pl. $100 \cdot 0,16/(1+0,16) = 13,8$ tömeg%.

Kísérletileg a cement hidratációját vízforgalomtól elzárt és vízzel telített cementkő próbatesteken szokták vizsgálni (*Nothnagel* 2007). A vízforgalomtól elzáró utókezelés (versiegelte Lagerung) megelőzi a cementkő korai, egyenlőtlen kiszáradását, és a száradási zsugorodás hatására fellépő mikrorepedések kialakulását. Az ilyen, ún. vízforgalomtól elzáró utókezelés során a szorosan polietilén fóliába göngyölt próbatestet epoxi gyantával vonják be, majd alumínium fóliát ragasztanak rá, végül a külső sérülésektől is polietilén fóliával védik meg. Vízzel telítettnek a kizsaluzás után víz alatt tárolt (gesättigte Lagerung) próbatestet tekintik (ezalatt a kis víz-cement tényezőjű próbatest vizet vehet fel).

Ha a víz-cement tényező értéke kicsi ($x < 0,4$, mások szerint $x < 0,5$) és a beton külső víz-utánpótlást nem kap, akkor a kémiai zsugorodás a *belső önkiszáradás* következtében lép fel. Ezért a hidratáció és a szilárdulás, illetve a szövetszerkezet kialakulása alatt a pórus rendszerben feszültségek keletkeznek, amelyek külső térfogatcsökkenést okoznak. Az önkiszáradási zsugorodás külső vagy belső akadályokba ütközik, ezért „feszültség ébresztette autogén zsugorodás".

A megszilárdult betonban lejátszódó *kémiai duzzadás* a térfogatnövekedéssel járó kémiai-ásványtani reakció következménye. Oka általában a nagymértű rakciótermékek képződésében keresendő, mint például a másodlagos ettringit (szulfátduzzadás) vagy az alkáli kovasav-gél (alkáli reakció). Minthogy a szabványos cement cementköve térfogatálló, kémiai duzzadás a szilárd betonban akkor lép fel, ha a cementkő az adalékanyaggal reakcióba lép (alkáli reakció), vagy ha reakcióképes anyagok kívülről a betonba szivárognak (szulfátduzzadás).

A *duzzadó cementek* az ellenőrzött kémiai duzzadás folytán például a hidratáció alatt fellépő zsugorodás tudatos kiegyenlítésére alkalmasak. Erre a célra például az Egyesült Államokban kifejlesztettek egy különleges, úgy nevezett „K típusú" cementet. Németországban ilyen cementet szerkezet építési célra használni nem szabad, mert a hidratáció közben zajló kémiai duzzadás a környezeti nedvesség függvénye, és ezért mértéke nem tervezhető. Ezen kívül a hidratáció közben zajló kémiai duzzadás a szövetszerkezet fellazulásával, szilárdság csökkenéssel, az áteresztőképesség növekedésével jár. Duzzadó cement kötőanyagú különleges termékek a Magyarországon is gyártott kiöntő-, horonytömítő-, injektáló-, pillanatkötő- stb. habarcsok, és a bontási munkák segédanyaga, a „repesztő habarcs" is (például a Pagel-Spezial-Beton GmbH termékei, amelyek hazai gyártója az Extracem Kft. volt).

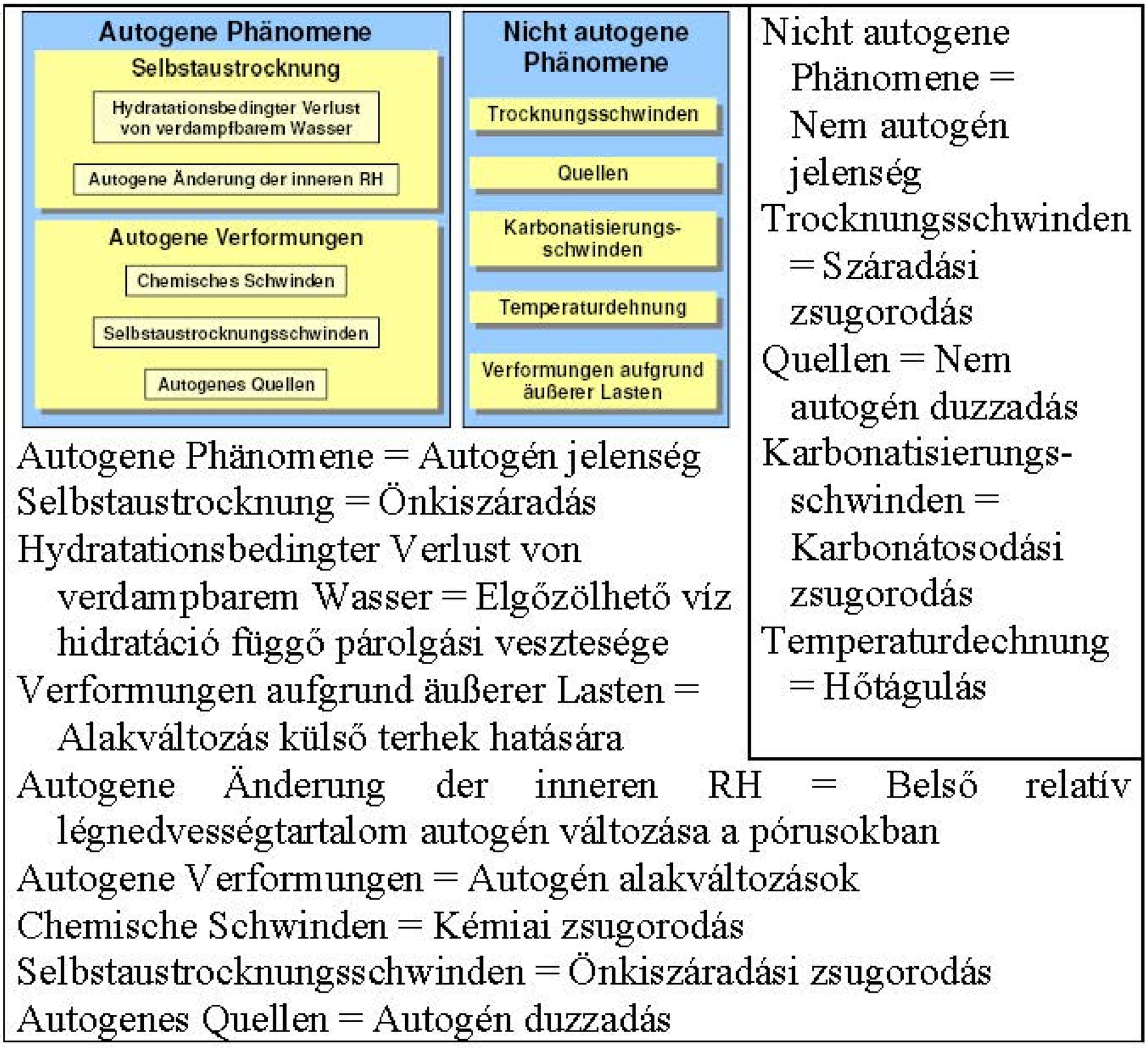
Külső erőknek ki nem tett, zárt, állandó hőmérsékletű beton alakváltozását autogén alakváltozásnak nevezzük, és az *autogén zsugorodás* vagy *autogén duzzadás* lehet.

A térfogat külső csökkenését ***autogén zsugorodásnak*** nevezzük, és lineáris alakváltozásként kezeljük. A közönséges betonok autogén zsugorodása legfeljebb $\varepsilon_{cs} = -0,1$ mm/m, a nagyszilárdságú betonoké -0,15 és -0,25 mm/m közé esik.

A kis víz-cement tényezőjű, kényszerfeszültség alatt lévő épületszerkezetekben az autogén zsugorodás korai repedéseket ébreszt, mert a zsugorodási alakváltozás már nagyon korán hat a teljes keresztmetszetre. Az autogén zsugorodás a *száradási zsugorodás* részének tekinthető.

Autogén zsugorodás akkor következik be, ha a hidratáció alatt a fiatal betonban lévő cement annyi vizet von el a pórusszerkezetből, hogy a beton 70-90 % relatív nedvességtartalom esetén hamar tömegállandósági állapotba kerül. A kis víz-cement tényezőjű beton olyan kevés vízzel készül, hogy a hidratáció folytán erős belső kiszáradás megy végbe, amely számottevő zsugorodással jár. Ez rendszerint a nagyszilárdságú, nagyteljesítő-képességű betonoknál jelentkezik, ahol a cementtartalom relatív magas és a víz-cementtényező kicsi. Autogén zsugorodásról (*2.4. ábra*) a kis víz-cement tényezőjű ($x \leq 0{,}4$) betonok (ezek általában nagyszilárdságú, nagyteljesítő-képességű betonok) esetén beszélünk. Mértéke különösen $x = 0{,}3$ körül és jelentős finomrész-tartalom (pl. szilikapor) esetén lehet igen jelentős. Az autogén zsugorodás a korai zsugorodás idején kezdődik és átnyúlik a száradási zsugorodás periódusába is. Az $x = 0{,}5$ vagy ennél nagyobb víz-cement tényezőjű betonok autogén zsugorodása elhanyagolható a száradási zsugorodáshoz képest. A jelentős finomrész- illetve hidraulikus kiegészítő-anyag tartalom növeli az autogén zsugorodást. Az autogén zsugorodás a korai zsugorodás idején kezdődik és a száradási zsugorodás periódusában is tart. Az autogén zsugorodás a beton hidratációjától és a szilárdságától lineárisan függ, de a szerkezeti elem geometriájától független.

Az autogén zsugorodás független a szerkezeti elem geometriájától, és a hidratációval, ill. a beton szilárdságával áll lineáris kapcsolatban.



2.4. ábra: Autogén és nem autogén alakváltozás jelensége *Jensen, O. M.* és *Hansen, P. F.* szerint [*Fontana,* 2007]

Az *autogén duzzadás* a zárt, állandó hőmérsékletű beton hidratáció okozta térfogatnövekedése. A „zárt" jelző azt jelenti, hogy a beton és a környezet között nincs anyagcsere. Önkiszáradás és autogén alakváltozás változó hőmérsékleten és környezeti anyagcsere közben is fellép. Ebben az esetben az autogén alakváltozás jelenségét külső hatások befolyásolják.

Karbonátosodási zsugorodás évekig tartó irreverzibilis kémiai és fizikai folyamat, amelyet a levegő szén-dioxid tartalmának a cementkő kalcium-hidroxidjával való reakciója vált ki. A beton karbonátosodása során olyan ásványok ($CaCO_3$, azaz kalcium-karbonát) keletkeznek, amelyek térfogata kisebb, mint a nem karbonátosodott betoné. A karbonátosodás alatt korábban kötött víz is felszabadul, amelynek elpárolgása a száradási

zsugorodást növeli. A karbonátosodási zsugorodás kis, 50 – 70 % közötti relatív páratartalom esetén a legnagyobb. A karbonátosodási zsugorodás hálós repedéseket eredményez, amelyek a beton felületi korrózióját és fagyállóságát kedvezőtlenül befolyásolják. A karbonátosodási zsugorodás a kiszáradási zsugorodás 50 %-át is elérheti. Mérése nem fontos, mert csak a keskeny karbonátosodott zónában lép fel.

A ***száradási zsugorodás*** alatt a szilárd beton vízvesztesége, kiszáradása folytán fellépő zsugorodást értjük. A száradási zsugorodást a kapilláris pórusokban lévő kémiailag nem kötött víz leadása okozza. A száradási zsugorodás mindenekelőtt a környezet nedvességtartalmától, a szerkezeti elem méreteitől és a beton összetételétől függ.

A száradási zsugorodás a kötés végén, a szilárdulás kezdetén indul és általánosan kb. egy évig tart, tehát egy lassú folyamat, amely egy végértékhez közelít. Ezalatt a cementkő pórusai kiszáradnak, a teljesen kiszáradt beton nem zsugorodik tovább. A száradási zsugorodás mértéke és időtartama erősen függ a környezeti viszonyoktól, például a levegő páratartalmától, illetve az ezt befolyásoló tényezőktől, és a szerkezet geometriájától, elsősorban a száradó felület nagyságától. A száradási zsugorodás minden beton esetén előfordul, de minél nagyobb a víz-cement tényező annál jelentősebb.

Az autogén zsugorodás és a száradási zsugorodás folytán a cementkő térfogata csökken, amelyet a térfogatállandó adalékanyag szemek akadályoznak.

2.3. A zsugorodást befolyásoló tényezők [*Kausay*, 2009], [*Balázs*, 1983]

A beton zsugorodása és annak végértéke számos tényezőtől függ. Elsősorban függ a beton összetételétől, azon belül is:

- a cementtartalomtól,
- a cement őrlésfinomságától,
- a finomrész-tartalomtól,
- a finomrész őrlés-finomságától,
- a víz-cement tényezőtől,
- az adalékanyag mennyiségétől,
- az adalékanyag típusától,
- az adalékanyag vízfelvételétől/víztartalmától,

– az alkalmazott adalékszerektől (pl. folyósítószerek) és kiegészítő anyagoktól (pl. szálak)

továbbá függ a beton korától, részletesen

– a hidratáció fokától
– a beton korától a száradás kezdetének (pl. kizsaluzás) időpontjához képest

és egyéb külső tényezőktől, mint

– az utókezeléstől,
– a környezet relatív páratartalmától,
– a környezeti hőmérséklettől,
– az építőelem geometriájától (felületének és térfogatának arányától).

A megszilárdult pépben (a cementkőben) a víz háromféle módon lehet jelen:

– kémiailag kötött formában (szerkezeti víz)
– fizikailag kötött (adszorpciós) víz formájában a felületen vagy a rétegek között
– kapilláris víz formájában.

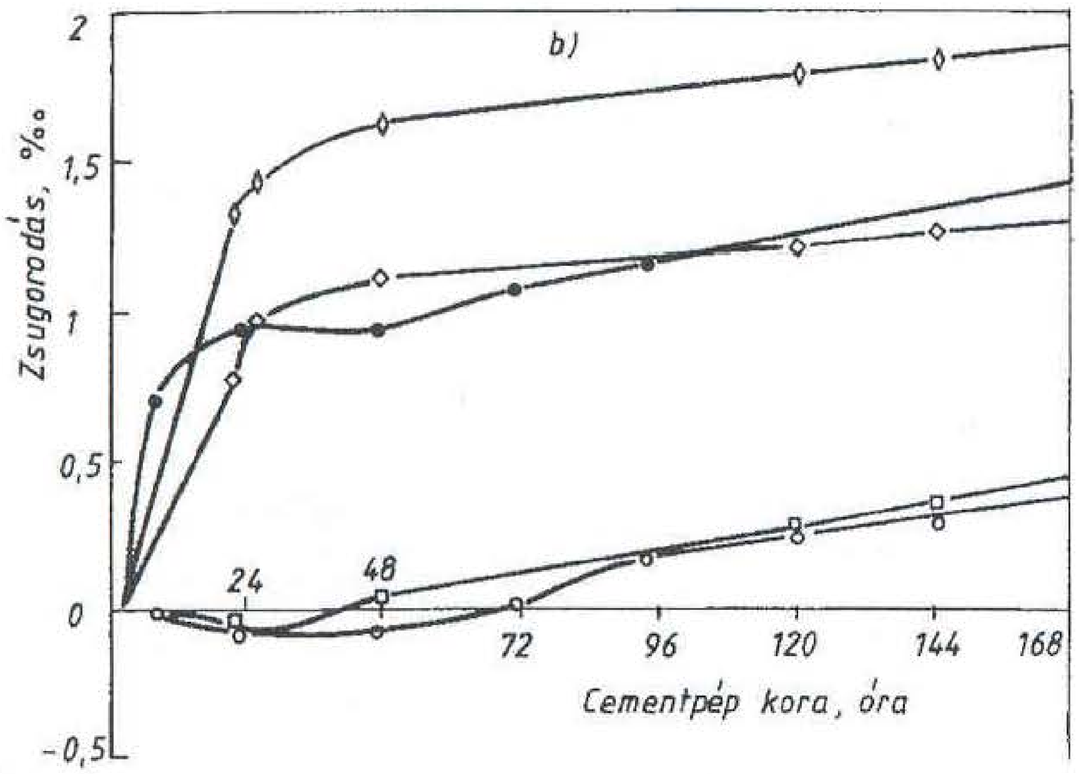
A vízvesztés minden esetben zsugorodással jár, a víz felvétele pedig duzzadással. A kapilláris víz mennyisége a beton „élete” során változhat, a kémiai víz elvesztése vissza nem fordítható folyamat.

Az egyik legjelentősebb tényező a beton zsugorodásában a *környező levegő páratartalma*.

A zsugorodás időben lejátszódó folyamat, kezdetben jelentős mértékű, majd idővel egy állandó értékhez tart. A *2.5. ábra* egy átlagos zsugorodási folyamatot szemléltet. Végértékét akkor éri el, ha létrejön a környező levegő relatív nedvességtartalma és a beton kapillárisaiban lévő víz közötti egyensúlyi állapot. A kiszáradás azonban a felületen kezdődik meg és külső rétegek zsugorodását gátolják a belső, nem zsugorodó részek. Ez a felületeken repedést okoz. Minél vastagabb a szerkezet, illetve minél kisebb a száradó felület és a tréfogat aránya, annál később ér véget a folyamat.

Szemben a száraz levegőjű belső terek zsugorodás csökkentő hatásával, a külső térben csökken a zsugorodás, mert ott nagyobb alevegő

páratartalma, és a nedvesedési ciklusok száma. Így például a belső térben lévő, 0,6 mm/m zsugorodású közönséges beton zsugorodása a külső térben (például útburkolat esetén) 0,3 mm/m értékre csökken (Zement-Taschenbuch 2008).

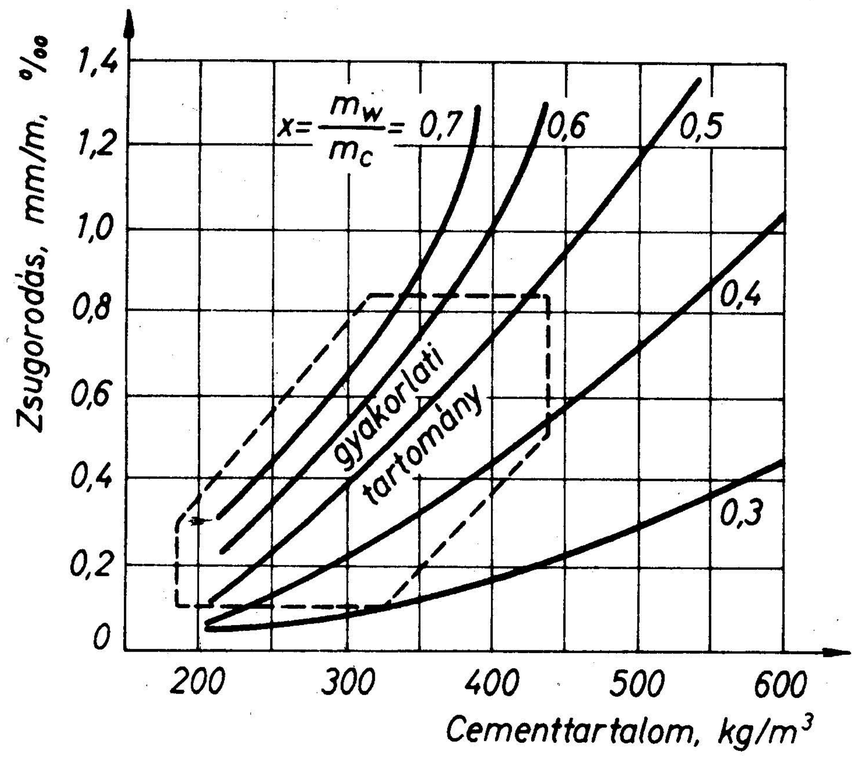


2.5. ábra:
A beton zsugorodása az idő függvényében
[*Balázs* et al., 2002]

A másik legfontosabb tényező a **beton összetétele**. Ha egyforma méretű és vékony próbatesteket vizsgálunk, akkor a folyamat relatív gyorsan lezajlik, és ha a vizsgálat során a környezeti paramétereket állandósítjuk laborkörülmények, klímakamra), akkor vizsgálható a beton összetétele okozta különbségek.

A *cementtartalom* jelentős hatással van a zsugorodásra. Minél nagyobb a cementtartalom, annál nagyobb a zsugorodás (*2.6. ábra*).

A *keverővíz mennyisége* már nem ilyen egyértelmű. Ha nagyon kevés vizet adunk a betonhoz (pl. a kémiai vízigények megfelelőt), akkor a beton autógén zsugorodása jelentős lesz. Ha viszont a víz-cement tényező nő, akkor a többletvíz (amit kémiailag nem köt meg a beton) száradási zsugorodást okozva előbb-utóbb távozik a betonból, tehát ismét növekszik a beton zsugorodása. A cementtartalom és a víz-cement tényező hatását a beton zsugorodására a *2.6. ábra* szemlélteti.



2.6. ábra: A beton zsugorodása a víz-cement tényező és a cementtartalom függvényében [*Balázs,* 1983]

Régebben a cementkő-térfogat zsugorodásra gyakorolt hatását a friss beton konzisztenciájának hatásaként értelmezték, és ezért a zsugorodás végértékét a környezeti feltételek, a konzisztencia és a szerkezeti elem átlagos vastagsága függvényében fejezték ki. A folyósító adalékszerek megjelenésével a friss beton konzisztenciája a betonösszetétel zsugorodásra gyakorolt hatásának jellemzése szempontjából háttérbe szorult.

A *szilikaport* a CEM II/A-D fajtájú MSZ EN 197-1:2000 szerinti *portlandcement fő alkotórészeként*, 6-10 tömeg%-ban, a klinkerrel és a kalcium-szulfáttal (gipsszel) együttőrölve alkalmazzák. Feltétel, hogy a szilikapor izzítási vesztesége (MSZ EN 196-2:2005) legfeljebb 4,0 tömeg%, *BET* szerinti fajlagos felülete (ISO 9277:1995) legalább 15 m^2/g legyen.

A CEM II/A-D fajtájú cement nyomószilárdsági osztálya 52,5 R, bármely környezeti osztályú beton készítéséhez használható. (A szilikaport tartalmazó kompozitcementek esetén már nem mindig ilyen kedvező a helyzet.) Adalékszerekkel (például nagy teljesítőképességű folyósítószerekkel) való összeférhetőségét adagolásuk függvényében feltétlenül meg kell vizsgálni. A CEM II/A-D 52,5 R típusú *szilikapor-portlandcementtel* készített, megfelelő összetételű és gyártású beton tömörsége, szilárdsága, kopásállósága, fagy- és olvasztósó-állósága, kémiai ellenálló képessége, lágy víz oldóhatásával szembeni ellenállása nagy, zsugorodása csekély.

Az utókezelés nélküli szilikaporos beton zsugorodása az utókezelt szilikapor nélküli betonénak másfél- kétszerese is lehet, ezért a szilikaporos beton utókezelése, amely ezt a különbséget jelentősen csökkentheti, igen fontos.

Az *adalékanyag* fajtája és térfogataránya a beton légnedvességtől függő alakváltozásra van hatással, mivel egyrészt a növekvő adalékanyag tartalom a cementtartalom csökkenésével jár, másrészt az adalékanyagváz az alakváltozásokat gátolja. Legalább egy napos kizsaluzási idő és ezt követő – 20 °C hőmérsékleten és 65 % relatív páratartalom melletti – kiszáradás esetén egyedül a cementkő zsugorodása 3 mm/m. Nem zsugorodó kvarcalapú adalékanyaggal készített közönséges beton esetén ez az érték a kisebb cementtérfogat és az adalékanyagváz merevítő hatása folytán 0,6 mm/m értékre csökken. Az adalékanyag zsugorodást gátló hatása annál erősebb, minél nagyobb az adalékanyag rugalmassági modulusa és minél kisebb a saját zsugorodása. Ennek megfelelően a zsugorodásmentes homokkő adalékanyagú beton zsugorodásának végértéke 1,25 mm/m értékkel nagyobb, mint a zsugorodásmentes bazalt adalékanyagú beton zsugorodása, amely utóbbi csak 0,4 mm/m. A porózus adalékanyaggal készített, mint például a kagylósmészkő vagy az újrahasznosított adalékanyagú beton légnedvességtől függő alakváltozása sokkal nagyobb, ha maga az adalékanyag is duzzad vagy zsugorodik (Zement-Taschenbuch 2008).

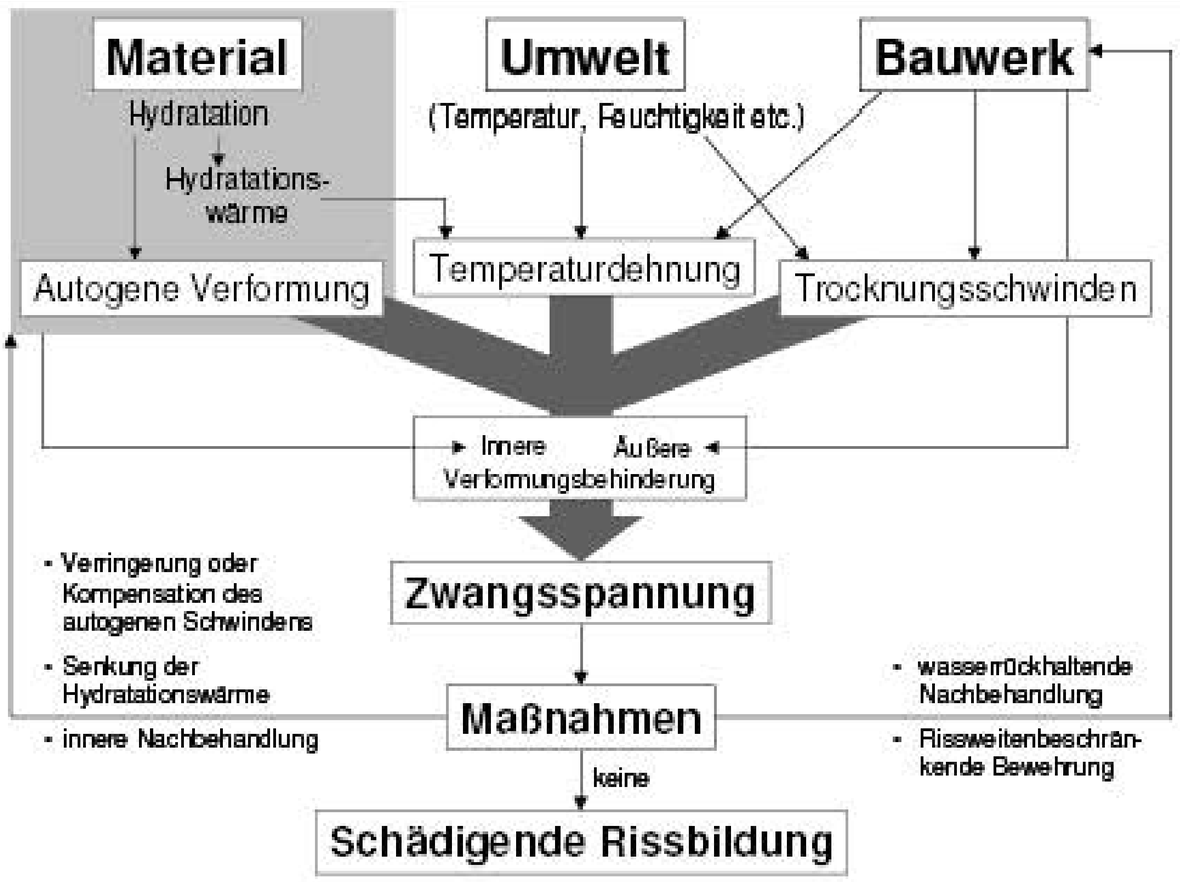
2.4. Nagyszilárdságú beton zsugorodása

Az autogén alakváltozás a cementkő, illetve a beton alakváltozása, amely külső hatás (terhelés, hőmérséklet) és vízfelvétel vagy vízleadás nélkül, tehát anyagtani sajátságként játszódik le. Az autogén alakváltozás lehet térfogatcsökkenés (autogén zsugorodás) vagy térfogatnövekedés (autogén duzzadás).

A beton autogén alakváltozásának jelensége a XX. század eleje óta ismert, de eleinte nem tulajdonítottak neki jelentőséget, mert az autogén alakváltozás a szokásos, nagy víz-cement tényezőjű ($x > 0{,}4$) betonok esetén a száradási zsugorodáshoz képest elhanyagolható. Az autogén alakváltozásnak gyakorlati jelentősége csak a nagyszilárdságú betonok 1980-as évekbeli kifejlesztése óta van. A nagyszilárdságú betonok fontos jellemzője a kapilláris porozitás nagymértékű csökkenése a vízadagolás

csökkentése és a finom töltőanyag (például szilikapor) adagolása következtében. A vízadagolást csak a tökéletes bedolgozhatóságot lehetővé tevő folyósító adalékszer alkalmazásával lehet csökkenteni. A nagyszilárdságú beton tömörebb struktúrája nem csak nagyobb szilárdságot eredményez, hanem erősen csökkenti a beton áteresztőképességét, és már a beton fiatal korában korlátozza a nedvesség mozgását. Ezért a vizes utókezelés csak a beton felületén fejti ki hatását. A beton mélyebben fekvő rétegeiben a hidratáció során a víz kémiailag kötődik, ezért e tartományban a cementkő kiszárad, ez az önszáradás jelensége. A cementkőben ennek következtében fellépő autogén zsugorodás a hidratáció első 24 órájában különösen erős. (*Fontana* 2007)

A nagyszilárdságú betonok cement-, illetve kötőanyagtartalma általában nagyobb a szokásos betonokénál, ami a nagyszilárdságú betonok nagyobb kezdeti hőmérséklet emelkedésére vezethet a hidratáció exoterm folyamata révén. Az autogén alakváltozás így a spontán hőtágulással szuperponálódik, amelynek a beton kihűlése során többlet térfogatcsökkenés a következménye. Ha a cementkő térfogatváltozásának akadályai vannak, akkor a cementkőben kényszerfeszültségek ébrednek (*2.7. ábra*). Az alakváltozás külső-belső akadályoztatása szerint beszélünk külső és belső kényszerről. A külső kényszerrel ellentétben a belső kényszer sajátfeszültségeket ébreszt, amelyek a szerkezeti elem erőjátékát nem befolyásolják. Ezekkel a kényszerfeszültségekkel a nagyszilárdságú betonok esetén is lényegében csak a cementkő kis húzószilárdsága áll szemben, úgy hogy ebben az időszakban a repedésképződés veszélye az autogén zsugorodás következtében a legnagyobb. Általános vélemény szerint a korai autogén zsugorodás fő oka a kapilláris húzófeszültség, amely lényegében a pórusszerkezetnek és a pórustérfogat önkiszáradásának függvénye.



Material = Anyag
Umwelt = Környezet
Bauwerk = Építmény
Hydratationswärme = Hidratációs hő
Feuchtigkeit = Nedvesség
Autogene Verformung = Autogén alakváltozás
Temperaturdechnung = Hőtágulás
Trocknungsschwinden = Száradási zsugorodás
Innere – Außere Verformungsbehinderung = Alakváltozás külső-belső akadályoztatása
Zwangsspannung = Kényszerfeszültség
Maßnahmen = Intézkedések
Keine Schädigende Rissbildung = Nincs káros repedésképződés

Verringerung oder Kompensation des autogenen Schwindens = Autogén zsugorodás csökkentése vagy kiegyenlítése
Senkung der Hydratationswärme = Hidratációs hő csökkentése
Innere Nachbehandlung = Belső utókezelés
Wasserrückhaltende Nachbehandlung = Utókezelés víz visszatartással
Rissweitenbeschränkende Bewehrung = Repedéstágasság korlátozó vasalás

2.7. ábra: A fiatal korú nagyszilárdságú beton repedésképződésének vázlatos ábrázolása (*Fontana* 2007)

A nagyszilárdságú betonok csoportjába tartozik az *öntömörödő beton*, amelynek szövetszerkezete a kis víz-mészkőliszt tényező és a friss beton különleges reológiai (terülési) tulajdonságai következtében a hagyományos betonénál tömörebb. Az öntömörödő beton pórustartalma kisebb, pórusszerkezete – a nagyszilárdságú betonhoz hasonlóan – finomabb, mint a hagyományos betoné. Ennek ellenére – szemben a nagyszilárdságú betonokkal – a fiatal korú öntömörödő beton esetén

az autogén zsugorodásra visszavezethető repedésképződést eddig nem figyeltek meg.

Nagyszilárdságú beton előállítására elméletileg minden MSZ EN 197-1 szabvány szerinti CEM I és nagyobb őrlésfinomságú CEM II típusú portlandcement alkalmas, azok közül is kedvező tulajdonságai folytán 105 N/mm^2 beton nyomószilárdságig leginkább a CEM I 42,5 R jelű portlandcement, 105 N/mm^2 nyomószilárdság felett a CEM I 52,5 R jelű portlandcement alkalmazása ajánlott. A túl korai kötést szükség esetén kötéskésleltető adalékszerrel lehet megakadályozni. Ha a lassúbb szilárdulási folyamat nem hátrány, akkor kedvező kísérleti eredmények alapján felhasználható a kisebb hőfejlesztésű CEM III/A típusú kohósalakcement is. A kis trikalcium-aluminát (felit, $3CaO \cdot Al_2O_3$, röviden C_3A) tartalmú, szulfátálló, úgy nevezett HS-cementek (Zement mit **h**ohem **S**ulfatwiderstand) kis vízigényük, mérsékelt hőfejlesztésük és szilárdulási sebességük, valamint csökkent kémiai zsugorodásuk és kis másodlagos ettringit képződési hajlamuk következtében szintén alkalmasak nagyszilárdságú betonok készítésére. Ilyen például a DIN 1164:2000 szerinti CEM I 42,5 R-HS, CEM I 32,5 N-HS, CEM I 32,5 N-LH/HS jelű szulfátálló portlandcement, amelyek trikalcium-aluminát tartalma ≤ 3 tömeg%, és Al_2O_3 tartalma ≤ 5 tömeg%; vagy az MSZ 4737-1:2002 szerinti CEM I 32,5 R-S jelű szulfátálló portlandcement, amelynek aluminát modulusa ($AM = Al_2O_3/Fe_2O_3$) $\leq$ $\leq 0,40$. Egyébként a cement szulfátállóságának feltétele az $AM < 0,64$ követelmény teljesülése, amely az egykori hazai „S-54 350” jelű szulfátálló portlandcement esetén az MSZ 4702-4:1982 szabványban, vagy a még korábbi MSZ 4702:1956 szabványban (akkor e cement megnevezése „S 54 jelű 500-as portlandcement” volt) megkövetelt $AM \leq 0,70$ értékkel szemben biztonságból $AM \leq 0,54$ volt (*Révay*, 2008). Lassúbb szilárdulási folyamat esetén az első órákban különös gonddal kell óvni a betont kiszáradástól.

Nagyszilárdságú beton gyártása során törekedni kell a betonösszetevők adagolásának ±1,0 tömeg%-os pontosságára. A mikroszilika szuszpenziót a száraz cementre juttatva, az adalékszereket utolsónak kell a betonkeverőbe juttatni. A friss beton ragadóssága miatt nagyobb keverési hatásfokra van szükség, mint a közönséges beton esetén.

A nagyszilárdságú beton erősen képlékeny – folyós konzisztenciája (terülési mérték 480-650 mm) folytán általában könnyen szivattyúzható és jól bedolgozható, de tömörítési energia igénye 30-50 %-kal több, mint a közönséges betoné. A beton korai kiszáradását – a korai repedések és szövetszerkezeti károsodások keletkezésének, a karbonátosodási sebesség megnövekedésének elkerülése érdekében is – minden eszközzel meg kell akadályozni.

A közönséges adalékanyag 4-8 mm szemnagyságú tartománya egy részének előre nedvesített könnyű adalékanyaggal történő cseréjével ún. „belső utókezelés" is elképzelhető. Amíg az $x > 0{,}4$ víz-cement tényezőjű közönséges beton esetén főképp a száradási és karbonátosodási zsugorodások fellléptének van veszélye, addig a nagyszilárdságú beton esetén elsősorban a kapilláris és a kémiai (autogén) zsugorodások mértéke, illetve veszélye nőhet meg. (*Fontana* 2007)

2.5. Ultra nagy szilárdságú beton zsugorodása

Az ultra nagy szilárdságú betont a nagy szilárdság mellett a rendkívül tömör szövetszerkezet jellemzi. Mind az összes porozitás, mind a tartósság szempontjából nagyon fontos kapillár-porozitás (0,1 μm feletti átmérővel) nagyon csekély. Ezáltal a transzport folyamatok a közönséges és a nagyszilárdságú betonhoz képest nagyon lassúak. A repedés nélküli ultra nagy szilárdságú beton ezáltal nagyon tartós. Káros anyagok csak a repedéseken keresztül képesek említésre méltó mértékben a beton belsejébe hatolni. A karbonátosodási mélység egy év alatt kisebb, mint 0,1 mm. A repedésekért a hőmérséklet-változások és a hajlító-húzófeszültségek mellett mindenek előtt a zsugorodás felelős. Különösen jelentős az ultra nagy szilárdságú beton esetén az autogén zsugorodás, amely a nedvességnek a környezet levegőjébe való leadása nélkül zajlik. A száradási zsugorodás csökkenő víz-cement tényező mellett rendszerint növekszik. A vízhiány belső kiszáradáshoz vezet (ezt önkiszáradásnak is nevezik), amelyet külső térfogat csökkenés kísér. A teljesen vagy részben kiszáradt pórusokban olyan nagy nyomáscsökkenés lép fel, hogy a cementkő összehúzódik. Ennek az összehúzódásnak megakadályozása pl. az adalékanyag vagy egy határos szerkezeti elem által, feszültséget ébreszt a fiatal betonban, amely ennek

következtében megrepedhet. Azt, hogy a repedésképződés az ultra nagy szilárdságú beton tartósságát csökkenti-e, még végérvényes nem tisztázták. Ha a nagyon vékony repedéseken keresztül víz hatol az ultra nagy szilárdságú beton szövetszerkezetébe, akkor kedvező esetben az utólagos hidratáció folytán a *repedések öngyógyulása* következik be. Kedvezőtlen feltételek mellett különböző károsodási folyamatok léphetnek fel, mint esetleg a másodlagos ettringit képződés vagy az alkáli szilikát reakció. Mind a két reakció betonkárosító duzzasztási nyomásokat ébreszthet, és ezzel a beton tartósságát csökkentheti. [*Fontana,* 2007]

A fiatal ultra nagy szilárdságú beton a kémiai átalakulás folytán zsugorodhat vagy duzzadhat, a hidratációs hő távozása és a kiszáradás következtében zsugorodhat. Ezeket összefoglaló néven külső hatások nélküli, ún. autógén alakváltozásoknak hívják [*Fontana,* 2007]. A kiszáradás (önkiszáradás) részben a hidratáció során lekötött víz felhasználásának, részben a pórusok relatív nedvesség-tartalma csökkenésének következménye. A vízhiány belső kiszáradáshoz vezet, amelyet külső térfogat csökkenés kísér. A teljesen vagy részben kiszáradt pórusokban olyan nagy nyomáscsökkenés lép fel, hogy a cementkő összehúzódik.

A száradási zsugorodás csökkenő víz-cement tényező mellett rendszerint növekszik. A száradási zsugorodást a víz alatt tárolt és vízzel telített fiatal cementkő duzzadása csökkentheti. Miközben a fiatal beton felület-közeli kiszáradását megfelelő utókezeléssel általában meg lehet akadályozni, addig a fiatal ultra nagy szilárdságú beton zsugorodására a nagy cement-tartalom és a kis víz-cement tényező folytán a kémiai átalakulás és a hidratációs hő távozása a mértékadó. Az ultra nagy szilárdságú beton esetén jelentős a kiszáradás nélkül zajló kémiai (autogén) zsugorodás, amely például 0,13 víz-kötőanyag tényező esetén a beton 28 napos korában a 0,2 mm/m értéket is megközelítheti. Hasonló jelentősége van hidratációs hőfejlődésnek, amelynek hatására 350 – 400 kg/m^3 cement-tartalom esetén a kezdetben 20 °C hőmérsékletű friss beton a megengedett felső korlátnak tekinthető 70 °C hőmérsékletre is felmelegedhet. A beton hűlése közben a keresztmetszeti hőmérséklet-gradiens sajátfeszültségeket ébreszt, amelyek felület közeli repedéseket hozhatnak létre.

A hidratációs felmelegedés kis víz-kötőanyag tényezővel, illetve kis hőfejlesztésű cement alkalmazásával csökkenthető.

Ha a zsugorodást valami akadályozza (például az adalékanyag, a zsaluzat, az illeszkedő építőelem stb.), akkor a fiatal betonban gátolt alakváltozásból eredő feszültségek ébrednek, amelyek repedéseket okozhatnak.
A gátolt alakváltozásból eredő feszültségek a fiatal ultra nagy szilárdságú beton nagy ernyedési képessége következtében az első napokban csökkennek, majd növekszenek, és a beton esetleg megreped. Végérvényesen még nem tisztázták, hogy a repedésképződés az ultra nagy szilárdságú beton tartósságát csökkenti-e. Ha a nagyon vékony repedéseken keresztül víz hatol az ultra nagy szilárdságú beton szövetszerkezetébe, akkor kedvező esetben az utólagos hidratáció folytán a *repedések öngyógyulása* következik be. Kedvezőtlen feltételek mellett különböző károsodási folyamatok léphetnek fel, mint esetleg a másodlagos ettringit képződés vagy az alkáli szilikát reakció. Mind a két reakció betonkárosító duzzadási nyomásokat ébreszthet, és ezzel a beton tartósságát csökkentheti.

Ha a bedolgozott ultra nagy szilárdságú beton szabad felületet nem védjük meg a kiszáradástól és a napsugárzástól, akkor a felület a kis víz-tartalom és a nagy finomrész-tartalom folytán egyenetlen, ún. „elefántbőrös" lesz és korai, képlékeny vagy kapilláris zsugorodás is felléphet. Célravezető utókezelés a felület azonnali légmentes betakarása vagy állandó nedvesen tartása. Különösen előnyös, ha a fóliatakarás felhelyezése előtt a felületre utókezelőszert hordunk fel, mert ezáltal nemcsak az „elefántbőr" képződése, hanem a korai zsugorodásból származó felületi repedések keletkezése is megelőzhető.

2.6. Zsugorodás figyelembevétele a szabályozásban

Az MSZ EN 1992-1-1:2005 szabvány szerint a beton és vasbeton tartószerkezetek méretezése során a beton zsugorodását a tartó teherbírási határállapotának igazolásakor csak akkor kell figyelembe venni, ha az lényeges, például a vasbeton szerkezeti elem méretezése a II. feszültségi állapot (repedéskorlátozás esete) alapján történik, vagy az előfeszített vasbeton szerkezetekben a feszítőerő ráengedésekor a feszítő elemek

környezetében, ahol a $0{,}45 \cdot f_{ck,cyl}$ értéket meghaladó nagy feszültségek léphetnek fel.

A teljes zsugorodás végértékét az ($\varepsilon_{cs\infty}$) az MSZ EN 1992-1-1:2005 és a DIN 1045-1:2008 szabvány az autogén zsugorodás végértéke ($\varepsilon_{cas\infty}$) és a száradási zsugorodás végértéke ($\varepsilon_{cds\infty}$) összegeként adja meg:

$$\varepsilon_{cs\infty} = \varepsilon_{cas\infty} + \varepsilon_{cds\infty}$$

Az autogén zsugorodás a beton szilárdulási folyamatát kíséri, tehát legnagyobb része a betonozást követő napokban lejátszódik, számításmódja az MSZ EN 1992-1-1:2005 szerint (*Farkas* et al. 2006):

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca\infty}$$

ahol: $\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0{,}2 \cdot t^{0,5})$ és t a napok száma.

Az autogén zsugorodás végértéke ($\varepsilon_{cas\infty}$) a következő összefüggéssel számítható ki:

$$\varepsilon_{cas\infty} = 2{,}5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$$

A száradási zsugorodás végértéke ($\varepsilon_{cds\infty}$):

$$\varepsilon_{cds\infty} = k_h \cdot \varepsilon_{cds0}$$

A k_h tényező értéke a szerkezeti elem vastagságától függ (*2.1. táblázat*).

2.1. táblázat: A k_h tényező értéke

Elméleti vastagság, h_0, mm	k_h
100	1,00
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

A szabványok a betonösszetétel hatását a cement és a beton nyomószilárdsági osztálya segítségével írják le. Ebben a beton nyomószilárdsági osztálya lényegében a víz-cement tényező hatását fejezi ki. Az ε_{cds0} a gátolatlan száradási zsugorodás alapértéke a beton nyomószilárdsági osztályának és a relatív páratartalomnak a függvénye (*2.2. táblázat*).

2.2. táblázat: Az ε_{cds0} a gátolatlan száradási zsugorodás alapértéke

Szilárdsági osztály	Relatív páratartalom , %					
	20	40	60	80	90	100
	ε_{cds0} a gátolatlan száradási zsugorodás alapértéke, ‰					
C20/25	0,64	0,60	0,50	0,31	0,17	0
C40/50	0,51	0,48	0,40	0,25	0,14	0
C60/75	0,41	0,38	0,32	0,20	0,11	0
C80/95	0,33	0,31	0,26	0,16	0,09	0
C90/105	0,30	0,28	0,23	0,15	0,05	0

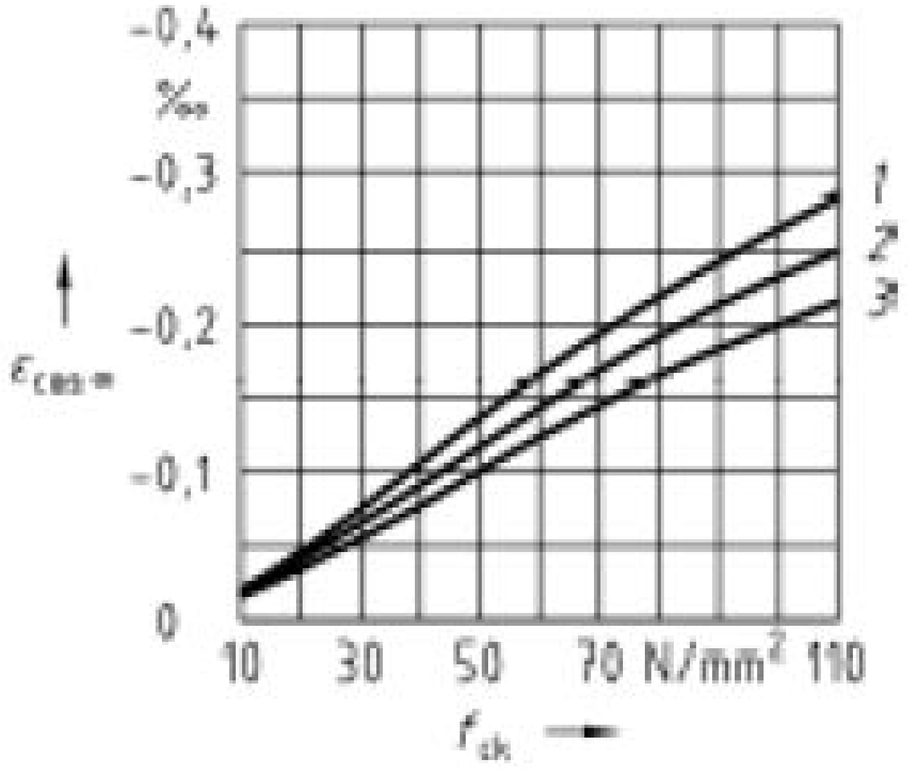
A zsugorodás azonos tárolási körülmények között aszimptotikusan tart a végértékhez.

A *2.8. ábrán* a beton autogén zsugorodásának végértéke látható a beton nyomószilárdságának jellemző értéke (f_{ck}) és a cement szilárdsági osztálya függvényében. A *2.9. ábrán* a beton száradási zsugorodásának végértéke szerepel a beton nyomószilárdságának jellemző értéke (f_{ck}), a cement szilárdsági osztálya, a belső relatív nedvességtartalom (RH) és a hatékony keresztmetszeti vastagság (h_0) függvényében.

A *2.10. ábra* adott méretű, különböző környezeti hatásoknak kitett betongerenda száradási zsugorodására mutat be példát. Könnyűbetonok esetén kiegészítő tényezőket is figyelembe kell venni.

A *2.11. ábra* a közönséges és a nagyszilárdságú beton összes átlagos zsugorodását szemlélteti. Mintegy három év elteltével a végértékek közel azonosak. A közönséges beton összes zsugorodása a száradási zsugorodásnak mintegy 1,2-szerese, a nagyszilárdságú betoné mintegy 3,8-szerese. A közönséges és a nagyszilárdságú beton zsugorodása között az a különbség, hogy a nagyszilárdságú beton legnagyobb zsugorodását okozó kiszáradás messzemenően a cement hidratációja alatt, a belső önkiszáradás következtében megy végbe. A nagyszilárdságú beton összes zsugorodásának nagy része tehát a szilárdulás során lejátszódik, és kevésbé függ a környezeti hatásoktól befolyásolt kiszáradási folyamattól. A *2.11. ábra* azt mutatja, hogy például az adott méretek esetén, 14 napos korban, az autogén zsugorodás nagyszilárdságú beton esetén az összes zsugorodás végértékének valamivel több mint 33 %-a, közönséges beton esetén csak mintegy 11 %-a.

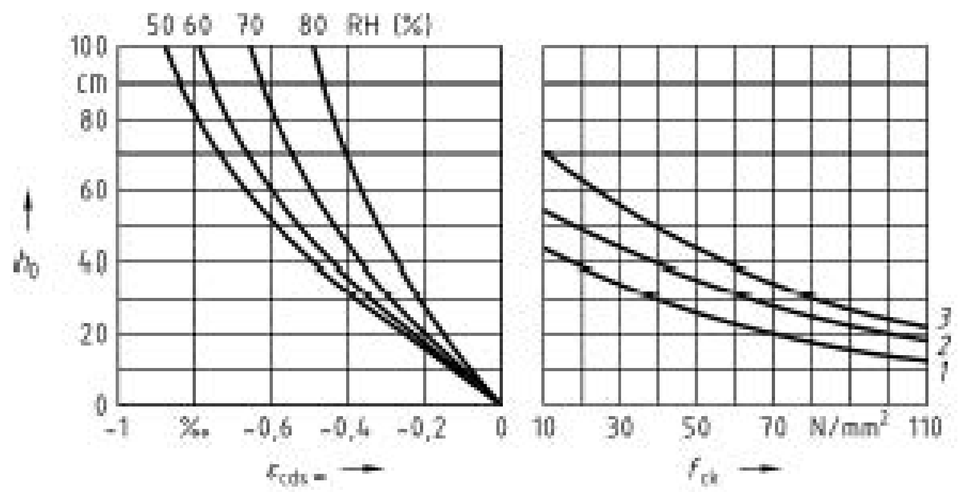
A zsugorodás ismételt nedvesedés és kiszáradás hatására lényegesen kisebb, mint az első kiszáradáskor volt, mert a zsugorodásnak csak egy része reverzibilis.

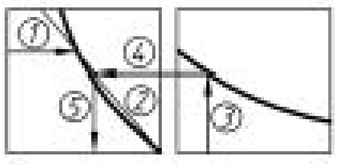


2.8. ábra: DIN 1045-1:2008 szabvány 20. ábrája: Közönséges beton autogén zsugorodásának ($\varepsilon_{ca\infty}$) végértéke ($t = \infty$ időpontban)

Magyarázat:

1. 32,5 N cement szilárdsági osztály
2. 32,5 R; 42,5 N cement szilárdsági osztály
3. 42,5 R; 52,5 N; 52,5 R cement szilárdsági osztály





RH = Belső relatív légnedvességtartalom a pórusokban

$h_0 = 2 \cdot A_c/u$ = Hatékony keresztmetszeti vastagság

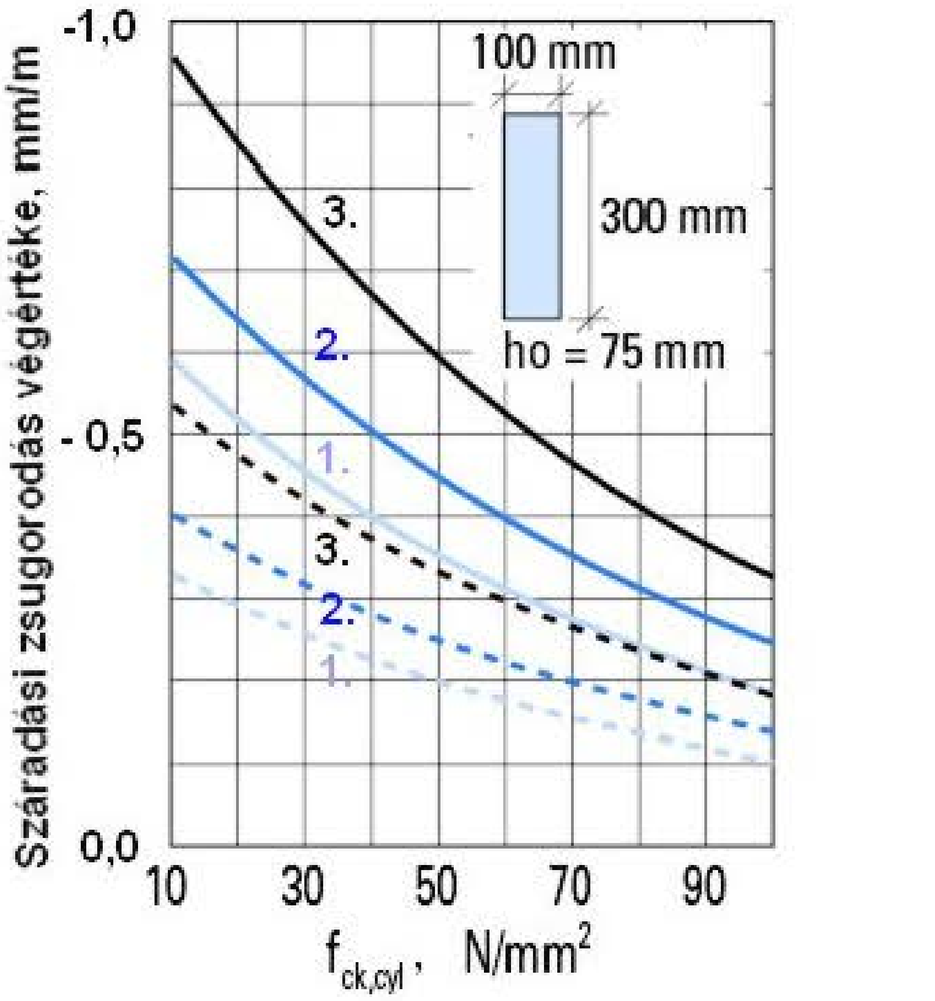
2.9. ábra: DIN 1045-1:2008 szabvány 21. ábrája: Közönséges beton száradási zsugorodásának ($\varepsilon_{cds\infty}$) végértéke ($t = \infty$ időpontban)

Magyarázat:

1. 32,5 N cement szilárdsági osztály
2. 32,5 R; 42,5 N cement szilárdsági osztály
3. 42,5 R; 52,5 N; 52,5 R cement szilárdsági osztály

A_c = Keresztmetszet területe

u = Keresztmeszet kerülete

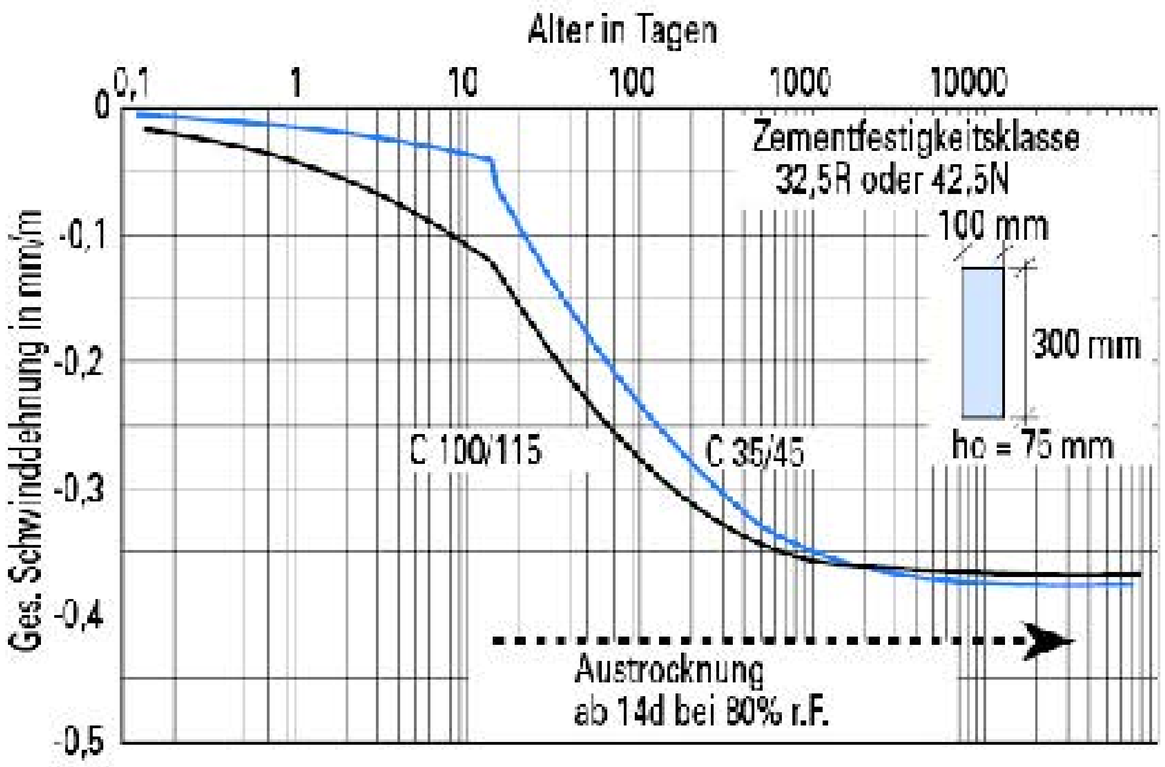


2.10. ábra: Példa az adott méretű betongerenda száradási zsugorodásának végértékére két különböző környezeti feltétel esetén, ha a hőmérséklet 10-30 °C közé esik és a nedves utókezelés legfeljebb a beton 14 napos koráig tartott.

Magyarázat:

1) 32,5 N cement szilárdsági osztály
2) 32,5 R; 42,5 N cement szilárdsági osztály
3) 42,5 R; 52,5 N; 52,5 R cement szilárdsági osztály

A h_0 hatékony keresztmetszeti vastagságot annnak feltételezésével számították ki, hogy a gerenda minden oldalán kiszáradt. Forrás: Zement-Taschenbuch 2008



Forrás: Zement-Taschenbuch 2008

Austrocknung ab 14 d bei 80 % r.F. = Kiszáradás 14 napos kortól 80 % relatív páratartalom esetén

2.11. ábra: Példa az adott méretű betongerenda összes zsugorodásának végértékére közönséges (C35/45) és nagyszilárdságú (C100/115) beton esetén, ha a cement szilárdsági osztálya 32,5 R vagy 42,5 N.

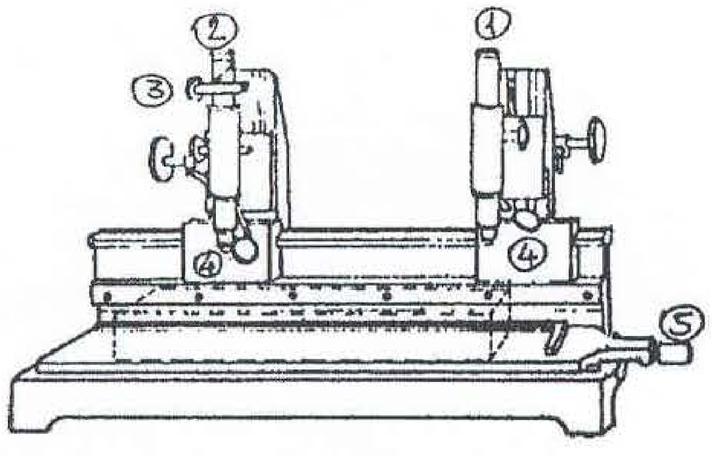
Alter in Tagen = Beton kora napokban kifejezve

Ges. Schwinddehnung = Összes zsugorodás

2.7. A zsugorodás vizsgálati módszerei

A zsugorodás vizsgálatára számos módszert dolgoztak ki. Alapvetően két csoportra oszthatók: a már frissbeton korban végezhető és a megszilárdult betonon végezhető vizsgálatokra. Nagyon kevés módszer van, ami mindkettőre alkalmas és ezek sem optimálisak mindkét esetben. A vizsgálatok legnagyobb része hosszmérésen alapul, van térfogatmérésen alapuló és számos módszer repedések szemrevételezését (is) alkalmazza.

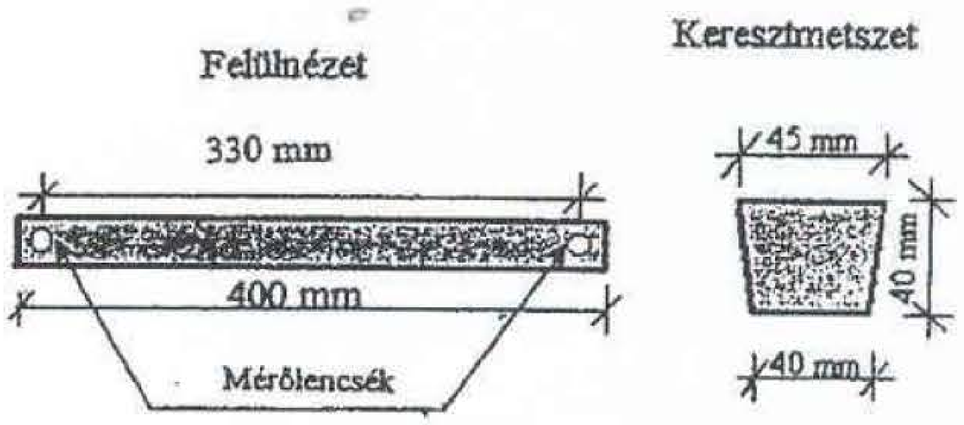
A Leizt-Wetzlar típusú zsugorodás mérő készülék (*2.12.* és *2.13. ábra*) frissbeton kortól kezdve alkalmas a beton zsugorodásának mérésére; hosszmérésen alapuló vizsgálat. A 40 x 45 x 400 mm-es próbatestekbe (*2.14. ábra*) két üveg mérőlapot kell helyezni. Ezeket úgy kell a próbatesten elhelyezni, hogy a beton zsugorodásával együtt mozogjanak és a távolságuk akkora legyen, hogy a két vizsgáló mikroszkóppal leolvashatók legyenek. Ezt követően a vizsgálatnak megfelelő időközönként leolvasásokat kell végezni. A beton frissbeton kori zsugorodás (ill. duzzadása) és a megszilárdult próbatesten mérhető zsugorodás is vizsgálható. Hátránya, hogy a pontosság csak a próbatest elmozdítása nélkül biztosítható stabilan, így egy készülékkel egyidőben csak egy próbatest mérhető, ezért csak az 1-2 napos zsugorodás mérésére szokás használni, a megszilárdult állapotot rendszerint más módszerrel célszerű tovább mérni ugyan ezeken a próbatesteken (pl. Huggenberger módszerrel, lásd később). A próbatest sablonban való szabad zsugorodásának biztosítása miatt célszerű fóliaborítást alkalmazni, ami csökkenti a párolgást (de teljesen nem tudja megakadályozni), tehát ezt figyelembe kell venni a kiértékelés során. A mérőeszköz kialakítása miatt csak speciális próbatesteken való laboratóriumi mérésekre alkalmas, építéshelyszínen nem alkalmazható.



6. ábra. Leitz-Wetzlar típusú zsugorodásmérő készülék
Jelölés: 1 – célzómikroszkóp; 2 – mérőmikroszkóp;
3 – okulármikrométer állító csavarja; 4 – fényvezető tükrök;
5 – próbatestet állító szán csavarja

2.12. ábra: Leitz-Wetzlar típusú zsugorodás mérő készülék [*Balázs* et al., 2002]

2.13. ábra: Leitz-Wetzlar típusú zsugorodás mérő készülék használat közben [*Balázs* et al., 2002]



2.14. ábra: A Leitz-Wetzlar készülékhez tartozó próbatestek kialakítása

A Dániai Műszaki Egyetem egy hasonló, szintén hosszmérésen alapuló vizsgálatot dolgozott ki [*Lura* et.al., 2007] a beton autogén zsugorodásának vizsgálatára. Műanyag harmonika alakú csőbe dolgozzák be a frissbetont egy kiegészítő hengerbe állítva és lezárják mindkét végét egy mérőcsúcsot tartalmazó kúppal (*2.15. ábra*). Ezzel teljes mértékben megakadályozzák a víz távozását, vagyis a száradási zsugorodás kizárásával végezhető a mérés. A harmonika alak, a megfelelő vályúba helyezve a kutatók szerint biztosítja a beton szabad zsugorodását. A mérés utána hagyományos vagy digitalizált módon is mérhető, párhuzamosan több próbatestet szokás készíteni és etalonnal párhuzamosan célszerű vizsgálni.

2.15. ábra: Dán műszer a beton autogén zsugorodásának vizsgálatára

Hosszmérésen alapul a Huggenberger-féle módszer is, de itt a próbatestekre már csak megszilárdult állapotban lehet elhelyezni a mérőcsúcsokat, és az összes zsugorodásfajtát egyben lehet mérni. Előnye, hogy a vizsgálat végezhető próbatesteken (tetszőleges számban egyetlen mérőeszközzel) (*2.16. ábra*) vagy akár beépített szerkezeten az építéshelyszínen is (*2.17. ábra*).

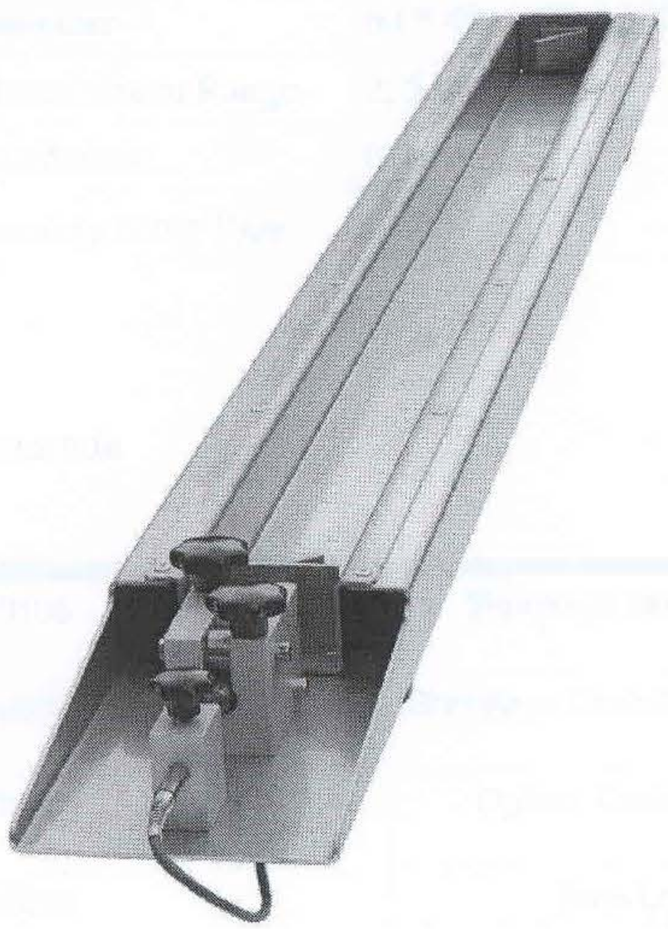
2.16. ábra:

Zsugorodásmérés Demec hosszváltozás mérővel próbatesteken (laboratóriumi körülmények között)

2.17. ábra:

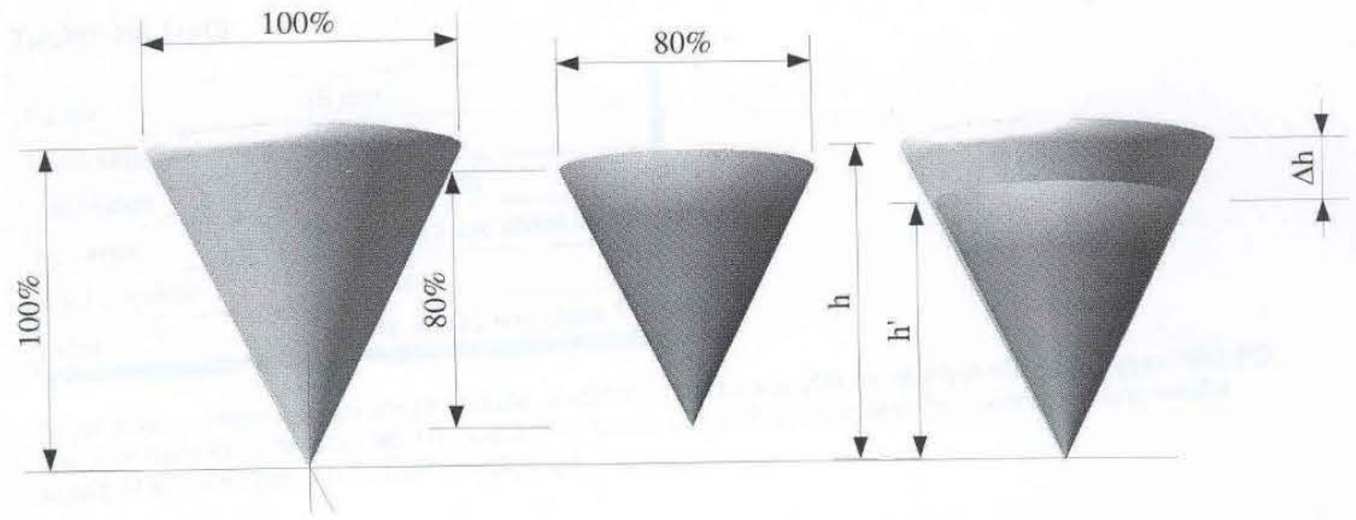
Zsugorodásmérés Demec hosszváltozás mérővel helyszínen (Szabadság-híd pályalemeze 2008)

A Schleibinger-féle zsugorodásmérő eszközöknek alapvetően két fajtája van: a csak hosszmérésen alapuló (*2.18 ábra*) és a térfogatméréses (*2.19. ábra*). A térfogatmérést kúp alakú próbatesten célszerű végezni, mert így hosszméréssel meghatározható a térfogati zsugorodás, csak a Δh értékét kell mérni (*2.20. ábra*), míg ha pl. henger alakú próbatestet használnák, akkor a térbeli alakváltozás nehezen lenne követhető (*2.21. ábra*).

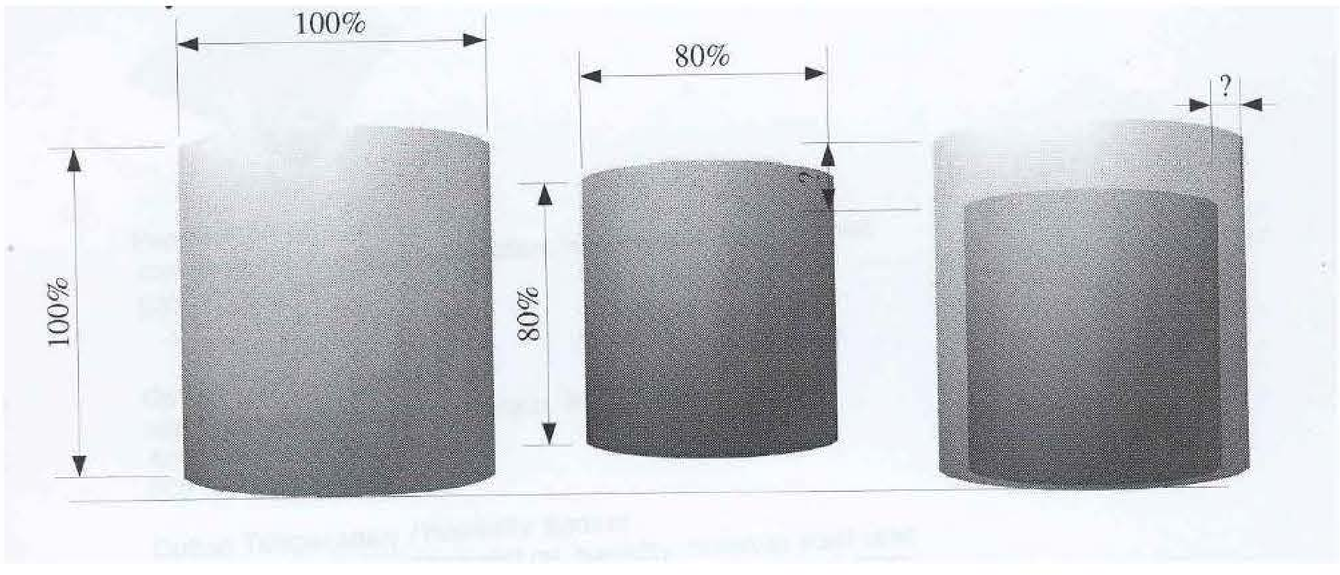


2.18. ábra:
Schleibinger-féle zsugorodás mérő készülék
[*Schleibinger*, 2009]

2.19. ábra:
Schleibinger-féle zsugorodás mérő kúp
[*Schleibinger*, 2009]



2.20. ábra: A zsugorodás mérés elve kúp alakú mérőedényben
[*Schleibinger*, 2009]



2.21. ábra: A zsugorodás mérés elve henger alakú mérőedényben [*Schleibinger*, 2009]

A kúp alakú próbatest felszínének süllyedéséből az alábbi képletek segítségével lehet meghatározni a zsugorodás értékét:

$$V=\frac{1}{3}\pi r^2 h\,;V'=\frac{1}{3}\pi r'^2 h'$$

$$r=h\tan(\alpha)\rightarrow V=\frac{1}{3}(h\tan(\alpha))^2\pi h$$

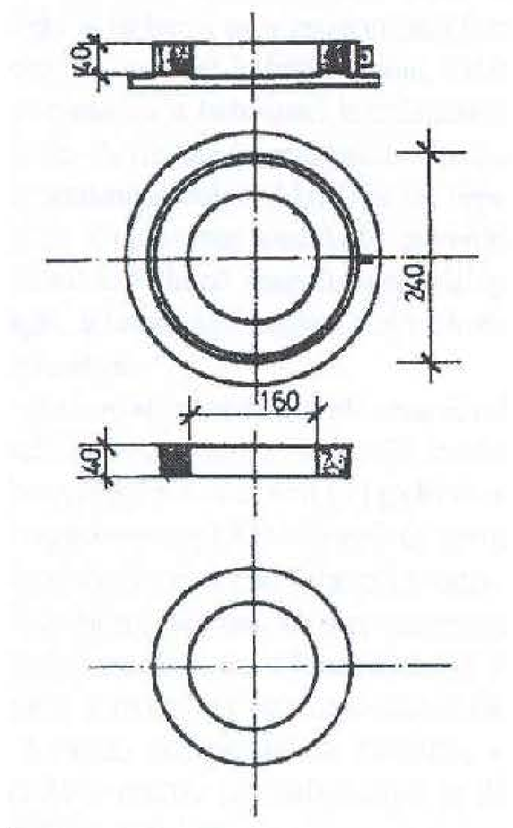
$$\alpha=const\rightarrow V=c\,h^3\,;V'=c\,h'^3$$

$$\frac{V'}{V}=\frac{h'^3}{h^3}\rightarrow\frac{h'}{h}=\sqrt[3]{\frac{V'}{V}}$$

A **zsugorodási repedésérzékenységet** 4 cm vastag, 30 cm belső és 60 cm külső átmérőjű, gyűrű alakú próbatesteken (*2.22. ábra*) kell vizsgálnia az osztrák Faserbeton Richtlinie 2002 szerint. A próbatestek alakja is nagymértékben elősegíti a repedések kialakulását, de ezen felül még a gyűrűk külső peremének belső oldalára felhegesztett 12 darab 40×40 mm-es acél lapka is, ami tovább gyengíti a próbatest repedésekkel szembeni ellenállását. A kísérleti eredmények összefoglalásánál szereplő *2.26. ábrán* látszik, hogy a repedések kivétel nélkül ezekbe a repedésindító lamellákba futnak be. A repedések kialakulása és mennyisége nagymértékben összefügg a beton összetételével, hőmérsékletével, a környezet hőmérsékletével, relatív páratartalmával, illetve légmozgásának sebességével. Ehhez a Faserbeton Richtlinie azt ajánlja, hogy állandó 20 °C-os hőmérsékleten és 65%-os relatív

páratartalom mellett egy szélcsatornába (*2.22.* ábra) helyezzük el a gyűrűket, majd 2 és 7 órás kora között intenzív légmozgással segítsük elő annak száradását.

2.22. ábra: A vizsgáló gyűrűk a szélcsatornában

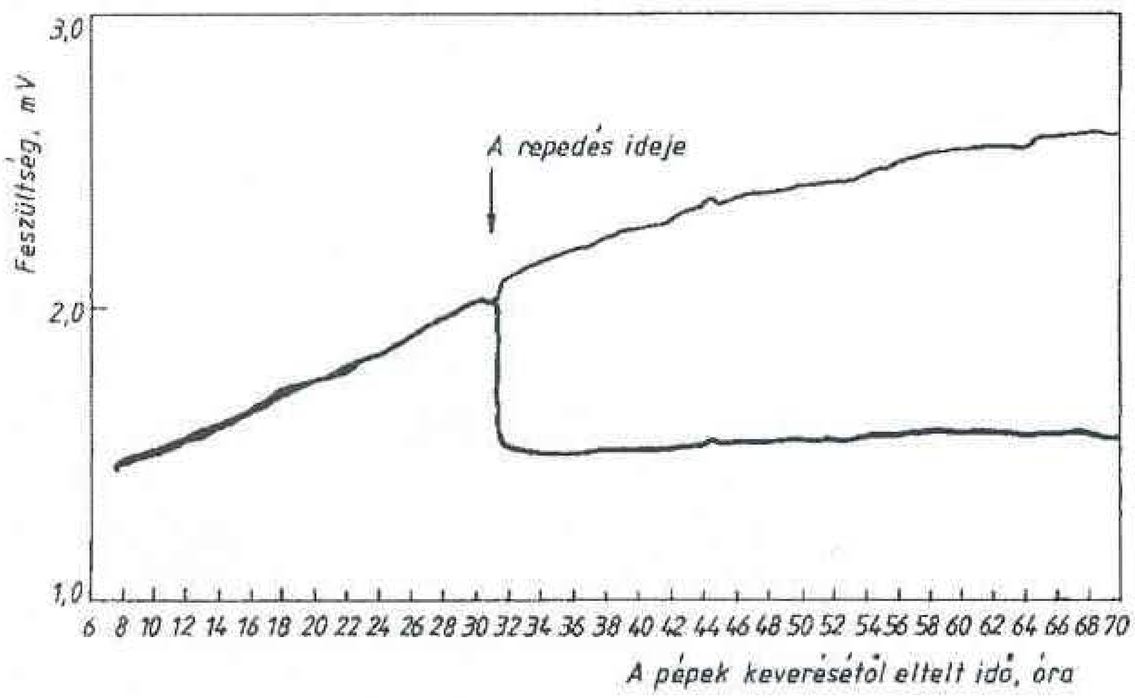


2.23. ábra:

A BME Építőanyagok Tanszéken kidolgozott gyűrűs sablon vázlata [*Balázs* et al., 2002]

2.24. ábra:

A BME Építőanyagok Tanszéken kidolgozott gyűrűs sablon vizsgálat közben [*Balázs* et al., 2002]



2.25. ábra: Gyűrűs vizsgálat eredményeinek értékelő grafikonja [*Balázs* et al. 2002]

2.8. A legújabb hazai tudományos kutatások és eseményeik

2.8.1. Repedésérzékenység, a korai repedések megakadályozása [*Józsa* et al., 2008]

A fagy- és olvasztósóálló, a vízzáró, a fagyálló, (az MSZ 4798-1:2004 szerinti környezeti osztályok), stb. betonoknál alapvető követelmény a repedésmentesség elérése. A repedések kialakulása szempontjából megkülönböztetünk erő hatására kialakuló és nem erőhatás okozta repedéseket.

A beton korai időszakában kialakuló repedéseinek vizsgálata nem csupán statikai, de egyben betontechnológiai kérdés is. Ezen repedések mennyiségének csökkentése a száradási és a kötési zsugorodás esetén elérhető a víz-cement tényező és a finomrész tartalom csökkentésével, azonban vannak olyan betontípusok, ahol követelmény a magas finomrész tartalom, például önterülő-öntömörödő, illetve nagyszilárdságú betonok esetén.

A repedések mennyiségét csökkenthetjük szálerősítés, mint a beton szívósságát, energiaelnyelő képességét, hajlító-húzószilárdságát növelő kiegészítő anyag alkalmazásával. Ha korai zsugorodási repedésekről van szó, nem kötelező a beton húzószilárdságát növelő vastag és hosszú (általában acél anyagú) szálerősítések alkalmazása, elegendő vékony és rövid (műanyag vagy üvegszálakat) keverni a betonba, ezek is jelentősen csökkentik a keverék repedésérzékenységét, ráadásul az acél szálakkal ellentétben nem rozsdásodnak, aminek

látszóbetonok esetén nagy jelentősége is lehet. További előnyként említhetjük a műanyag szálak kis gyártási költségét is [*Kovács* et al., 2004].

Már 4000 évvel ezelőtt az egyiptomiak is használtak szálerősítést az építkezések során leginkább állati szőröket és növényi rostokat keverve vályogtéglák alapanyagához. A szálerősített, cement alapú anyagok gyártása a XX. század elején merült fel. A 108 évvel ezelőtti műszaki színvonalon a szóba jöhető rostanyag cellulóz- vagy azbesztszálat jelentett.

Napjainkban az építőipari piacon lévő szálak nagyon széles skálán helyezkednek el, beszerezhetők az egészen vékony szálaktól kezdve (8-10 μm) az 500 μm-es vastagságig. Ugyanígy széles a választék a szálak anyagait tekintve: létezik acél, rozsdamentes acél, AR-üveg (alkáliálló), E-üveg (nem alkáliálló), polipropilén, poliakril-nitril, nylon, szén, bazalt stb. [*Józsa* et al., 2005]

A szálascement gyártásban az azbeszt kiváltását a vele szerzett pozitív tapasztalatok alapján a kezdeti időkben kis átmérőjű, rövid szálakkal oldották meg.

Ha a vékony és rövid szálak esetében nem a cementkő helyett a húzóerőt felvevő „vasalást" látjuk, hanem a szálaktól a cementkőmátrix tulajdonságainak megváltoztatását várjuk el, akkor azt kell vizsgálnunk, hogy milyen mennyiség javítja legjobban a cementkőmátrix tulajdonságait. Az alsó határt a vállalkozási gyakorlatból ismerjük: kb. 0,5 kg/m^3, ami 0,1 ÷ 0,2 térfogatszázaléknak felel meg. Az azbesztcement iparban ez (sok kísérlet eredménye alapján) a maximális száladagolás kb. 12 térfogat % környékén mozgott. Feltételezhetjük, hogy a cementpépre vonatkozóan ez a mesterséges szálak vonatkozásában is a felső határ környékét jelzi, ennél több szálat a cementpép már nem tud befogadni. Ez a betonokban szokásosan alkalmazott, a cementpépre vonatkoztatott 1 térfogat %-nál jelentősen nagyobb érték a jövőben valószínűleg csak a különleges szálascement termékeknél jöhet szóba. A vékony és rövid szálak optimális mennyiségének meghatározására további kísérletekre van szükség [*Für Kovács* et al., 2004].

A repedésérzékenységi kísérletekhez olyan betonkeverékeket célszerű alkalmazni, ahol nagymértékű zsugorodás várható a szilárdulás korai 3-4 napos szakaszában. A kiindulási receptúra az osztrák Faserbeton Richtlinie 2002 című műszaki irányelvben javasolt összetétel volt.

Azonos víz-cement tényező mellett a tiszta portlandcement köt leggyorsabban, ezért várhatóan az ilyen cementtel készült beton fog leggyorsabban zsugorodni [*Für Kovács* et al., 2004], [*Balázs* et al., 1979], így CEM I 42,5 N jelű cementtel dogoztunk. A cementadagolás 360 kg/m^3 volt. A száradási zsugorodás hatása nagy finomrész-tartalommal és nagy víz-cement tényezővel nő. Ha több víz tud elpárologni a betonból, akkor nagyobb lesz a száradási zsugorodás mértéke is [*Wittmann,* 1982]. Előbbiek miatt 140 kg/m^3 mészkőliszt adagolással és 0,61-es víz-cement tényezővel terveztük a keveréket. Az adalékanyag kvarchomok (0/4 frakció) és üveghabkavics vagy duzzasztott agyagkavics (4/8 és 8/16 frakció) volt.

Az osztrák műszaki irányelvnek megfelelően a terülés mértékét minden keverék esetén 500 és 550 mm közöttire állítottuk be folyósító adalékszer (Sika Viscocrete Neu 5) adagolásával azért, hogy a gyűrűs-szélcstornás kísérlet (*2.22. ábra*) elvégezhető legyen. Így tudtuk biztosítani a vizsgálat eredményét jellemzően befolyásoló állandóvíz-cement tényezőt minden recepturánál.

2.26. ábra: Repedésindító lamellákkal ellátott sablon és próbatest repedésvizsgálathoz

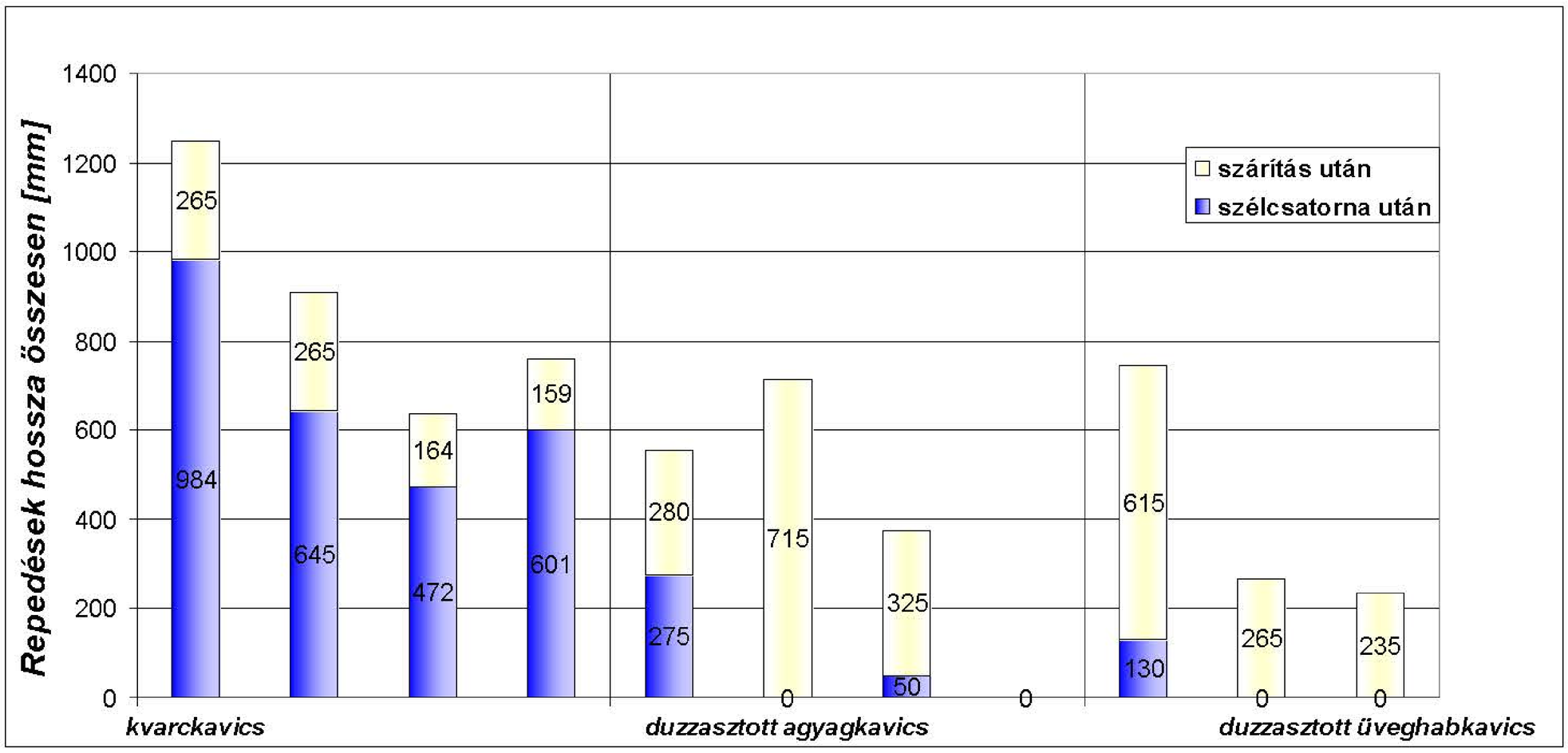
Azt tapasztaltuk, hogy az 5 órás szélcsatornás vizsgálat nem szárította ki teljes keresztmetszetében a próbatesteket, ezért 1 napos korban további szárításnak vetettük alá a gyűrűket egy közönséges szárítószekrényben 60 °C-on további két napon keresztül. Fontos különbség volt a szélcsatornához képest, hogy itt már a próbatest mindkét szabad oldalán távozhatott a nedvesség és magasabb volt a hőmérséklet, ennek köszönhetően a száradás is gyorsabban következett be.

Miután kivettük a szélcsatornából a próbatesteket, lemértük a kialakult repedések hosszát, majd összeadtuk az értékeket. Ugyanezt megismételtük a szárítószekrényes kezelés után is, és ezeket a mennyiségeket használtuk arra, hogy az egyes betonkeverékek repedésérzékenységét számszerűsítsük és összehasonlítsuk.

Minden keverék esetén azt tapasztaltuk, hogy a repedések mennyisége a szál nélkül készített keverék esetén volt a legnagyobb, 1 kg/m^3-es száladagolásnál jelentősen csökken a repedések összes hossza (*2.27. és 2.28. ábra*). Jól látható az eredményekből, hogy a műanyag szál ennél az adagolásnál jóval hatékonyabban csökkenti a repedések mennyiségét, mint a vele azonos méretű üvegszál. Ez azzal magyarázható, hogy a szálak mennyiségét darabszámban értve nem tükrözi megfelelően a tömeg szerinti mennyiség, mivel az üveg körülbelül két és félszer nehezebb a műanyag szálaknál, tehát ugyanakkora tömegű adagolás 0,46-szorosát, azaz kevesebb, mint feleannyi szálat jelent üveg esetén, mint műanyagnál. Ezért lehetséges, hogy azonos adagolás esetén a jobb húzószilárdságú üvegszál kevésbé tudja kifejteni repedéscsökkentő hatását.

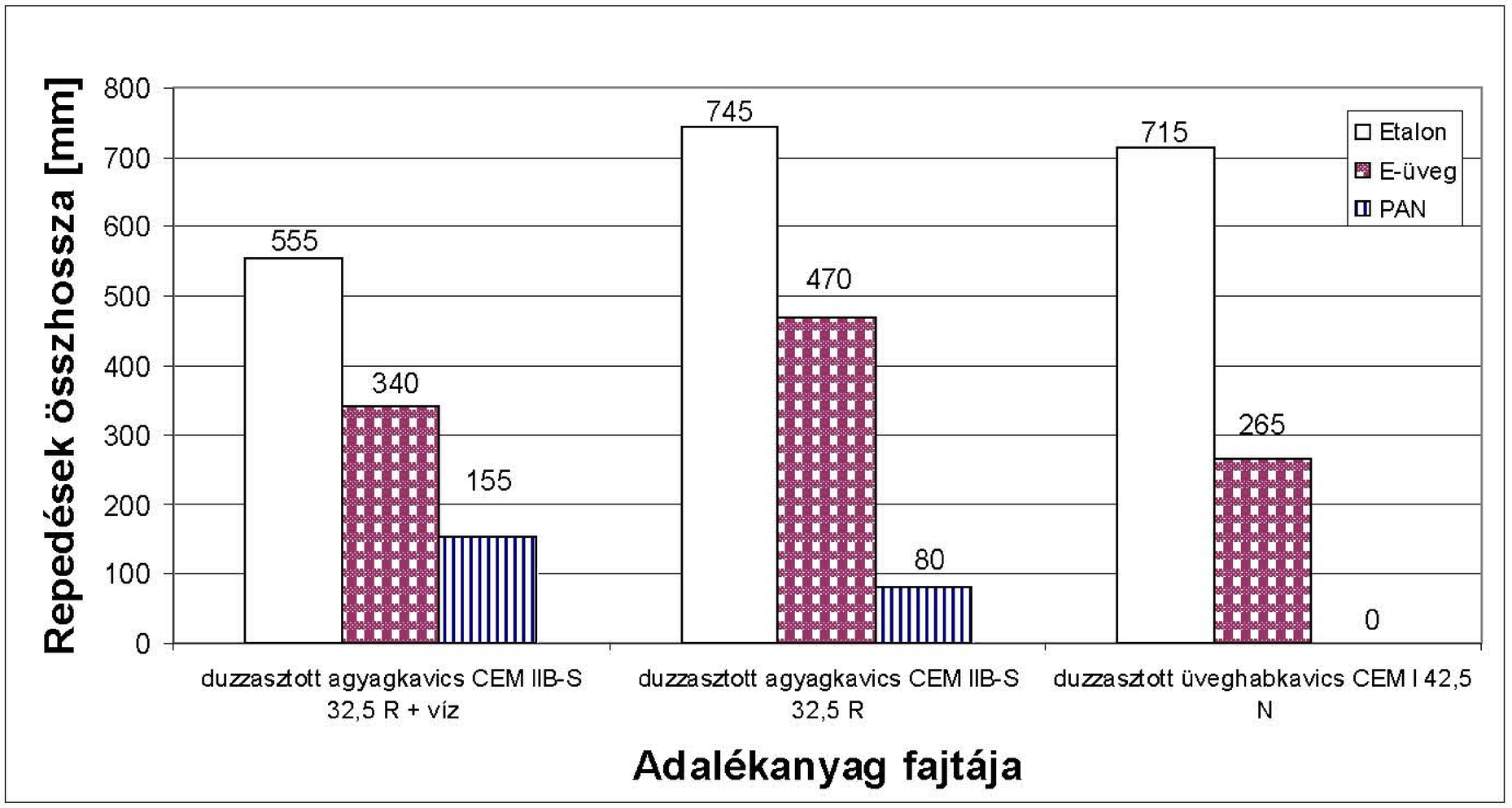
Az osztrák műszaki előírás által ajánlott vizsgálat elegendő repedést tud előidézni kvarckavics adalékanyagos betonok esetén, ahhoz, hogy össze tudjuk hasonlítani a szálerősített próbatesteken mért repedéshosszakat az „ETALON” nem szálerősített próbatesten mérhető értékkel (*2.27. ábra*). A könnyűbeton próbatesteken viszont nagyon gyakran előfordul (mind a korábbi kísérletek, mind a legújabbak eredményein jól nyomon követhetően), hogy nem repednek meg a szélcsatornás vizsgálat hatására a próbatestek (*2.29. és 2.30. ábra*). Ezért könnyűbeton esetén nagyobb jelentősége van a szárítószekrényes vizsgálatnak, mivel csak erősebb szárítással juthatunk olyan eredményekhez, melyek híven tükrözik a

keverékek közti különbségeket. Ha elfogadjuk a műszaki előírás azon kijelentését, hogy a szélcsatornás vizsgálat hűen modellezi egy valós szerkezet esetén a várható repedésérzékenység mértékét, akkor elmondhatjuk, hogy a könnyűbeton már szálerősítés nélkül is kevésbé érzékeny a száradási repedésekre, mint a normálbeton (*2.27. ábra*).

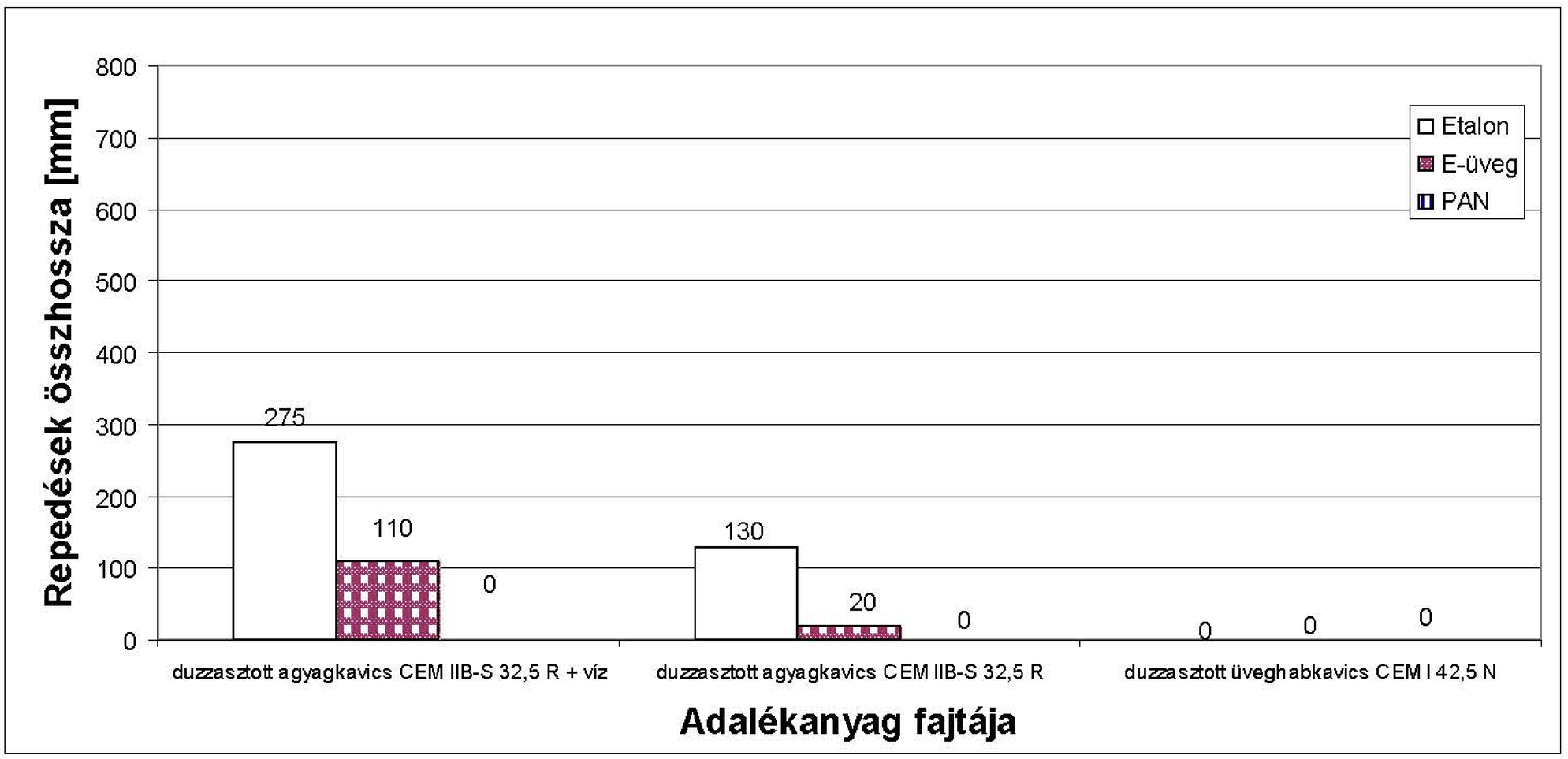


2.27. ábra: Szálerősítés nélküli (etalon) betongyűrűkön mért repedések összesített hossza szélcsatornás és szárítószekrényes kezelés után összesen

Bár a könnyűbetonok zsugorodása nagyobb mértékű, mint a normálbetonoké, (köszönhetően annak, hogy a rugalmasabb adalékanyag szemek kevésbé akadályozzák a zsugorodás lefolyását, mint a merevebbnek tekinthető kvarckavics szemcsék), ez a tendencia nem ültethető át teljes mértékben a repedésérzékenység esetére, még akkor sem, ha tudjuk, hogy a száradási zsugorodás és a száradási repedésérzékenység szorosan összefüggenek. Az un. belső utókezelés, azaz a könnyű adalékanyag szemek által a keveréskor felvett, majd a beton száradása alatt leadott víz a fent említett hatással ellentétes, lassítja a száradás folyamatát. Emiatt azonos betonmátrixnál könnyűbeton esetén csak később tud lejátszódni a zsugorodás, mint normálbetonoknál. Ugyanakkora alakváltozási teher már nagyobb szilárdságú cementkőre hat. Ha eléggé le tudjuk lassítani a zsugorodás lejátszódását, elkerülhetjük a repedések kialakulását.



2.28. ábra: 1 kg/m^3 száladagolással készített könnyűbeton gyűrűkön mért repedések összesített hossza szélcsatornás és szárítószekrényes kezelés után

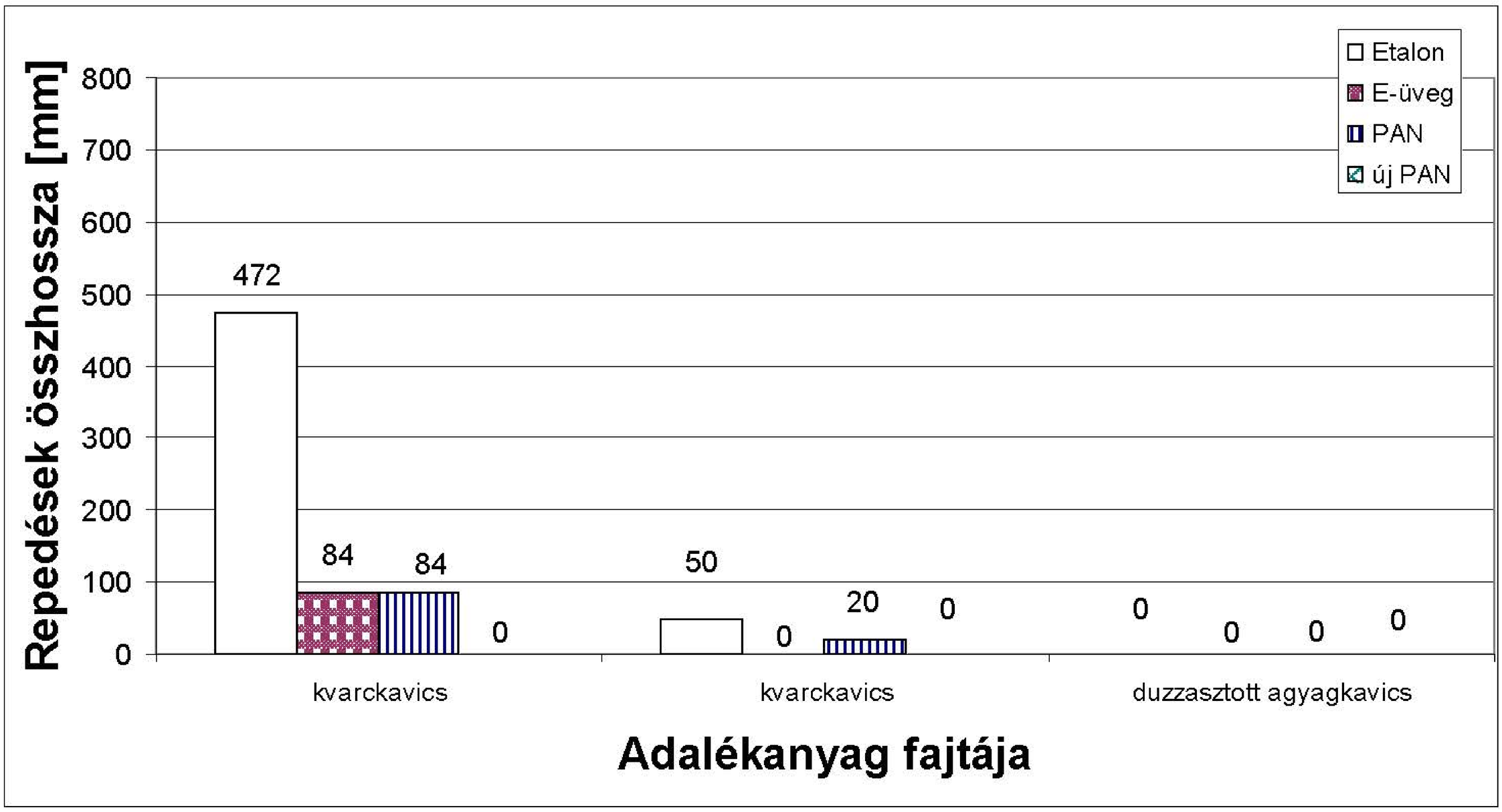


2.29. ábra: 1 kg/m^3 száladagolással készített könnyűbeton gyűrűkön mért repedések összesített hossza a szélcsatornás vizsgálat után

Az 1 kg/m^3-es száladagolású könnyűbetonnal ellentétben a 0,3 kg/m^3-es adagolású próbatesteken nem tapasztaltunk értékelhető különbséget repedésérzékenység tekintetében. (*2.30. és 2.31. ábra*). Az etalon próbatesteken mért eredményekből látszik, hogy az kvarckavics

adalékanyaggal készített beton sokkal érzékenyebben reagált a kísérletekre, azonos cementmátrixszal készítve (*2.31. ábra*). Ezek az eredmények jól megegyeznek a szakirodalomban fellehető adatokkal, ahol is körülbelül 1 V%-ra teszik az általunk vizsgált vékony és rövid szálak hatékonyságának alsó határát. Mi is ezt tapasztaltuk könnyűbetonok esetén, normálbeton esetén pedig további kísérletek végzésére van szükség, hogy eldönthessük, mi a legkisebb hatékony száladagolás.

2.30. ábra: 0,3 kg/m^3 száladagolással készített könnyűbeton gyűrűkön mért repedések összesített hossza szélcsatornás és szárítószekrényes kezelés után összesen



2.31. ábra: 0,3 kg/m^3 száladagolással készített könnyűbeton gyűrűkön mért repedések összesített hossza a szélcsatornás vizsgálat után

További kísérletek folynak annak érdekében, hogy meghatározzuk a maximális alkalmazható száladagolás mennyiségét, illetve a legnagyobb, és még hatásos száladagolás mértékét a repedésérzékenység tekintetében.

2.8.2. A különböző adalékanyagok hatása a zsugorodásra

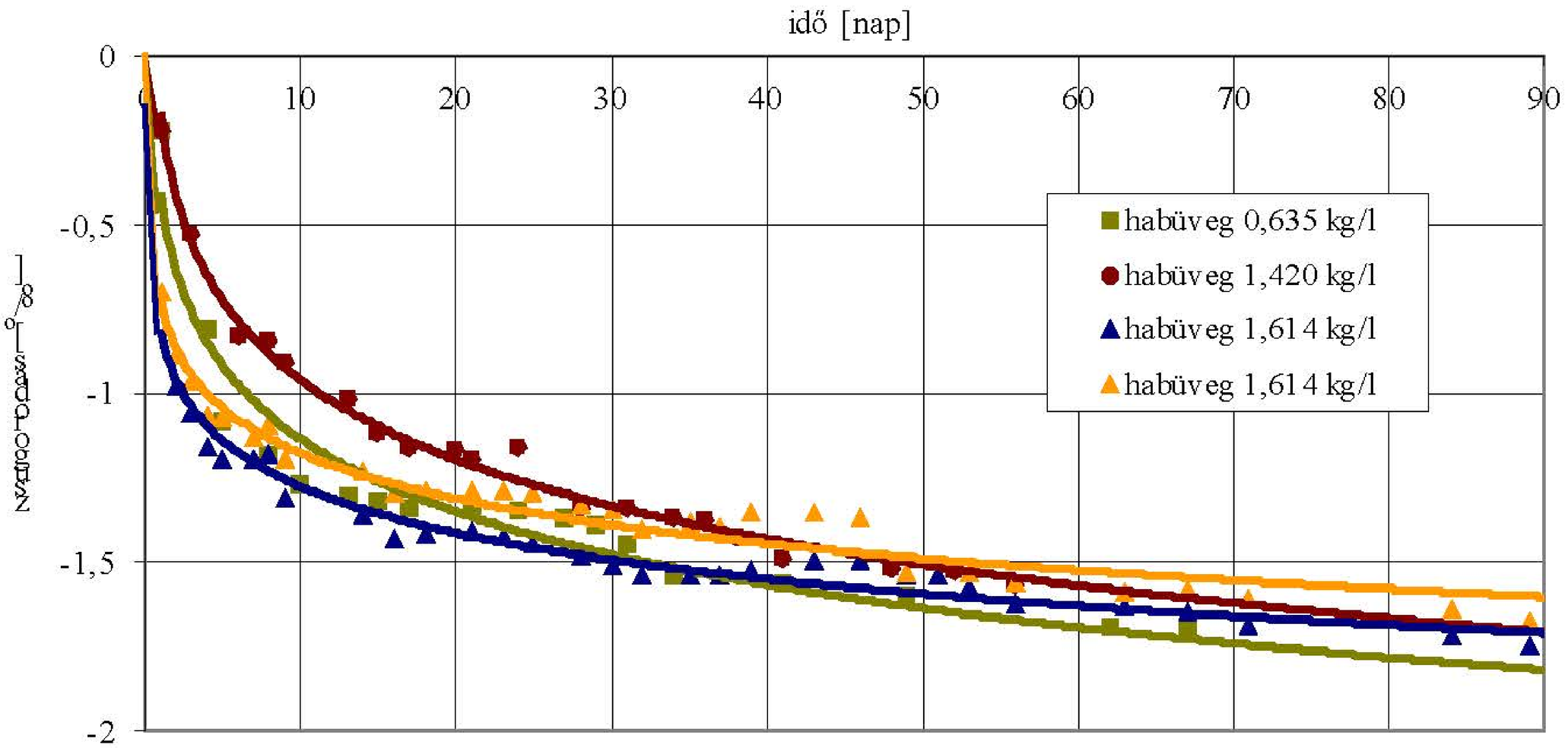
[*Nemes*, 2004], [*Nemes*, 2006]

Az adalékanyag a hagyományos betonok esetén nem vesz részt a zsugorodásban, sőt gátolja is a cementpép zsugorodását. Viszont, ha kvarc kavics, illetve homok helyet más (pl. könnyű) adalékanyagot alkalmazunk, akkor ez a hatás változik.

Általában igaz, hogy a könnyűbetonok zsugorodása nagyobb, mint a hagyományos, kavics adalékanyagos betonoké. Ez két okra vezethető vissza. Az adalékanyag gyakorlatilag nem zsugorodik, tehát a zsugorodás a cementkő zsugorodásából adódik, így elsősorban a cementkőtől függ a zsugorodás mértéke. A hagyományos kvarckavics adalékanyagos betonoknál rendszerint a telített beton az optimális, ugyanakkor a könnyűbetonoknál túltelített betonra van szükségünk az eltérő teherviselési mód miatt. Ezért a nagyobb péptartalom nagyobb zsugorodást eredményezhet azonos víz-cement tényező és cement esetén is. Másrészt az adalékanyag akadályozza a cementkő-váz zsugorodását. Ennek mértéke az adalékanyag merevségétől függ. A könnyű adalékanyagok szilárdsága és merevsége sok esetben kisebb, mint a kvarckavicsé, ami szintén nagyobb zsugorodást idéz elő. A kis zsugorodás elérése betontervezési kérdés. [*Nemes*, 2004], [*Brüll* et al., 1988]

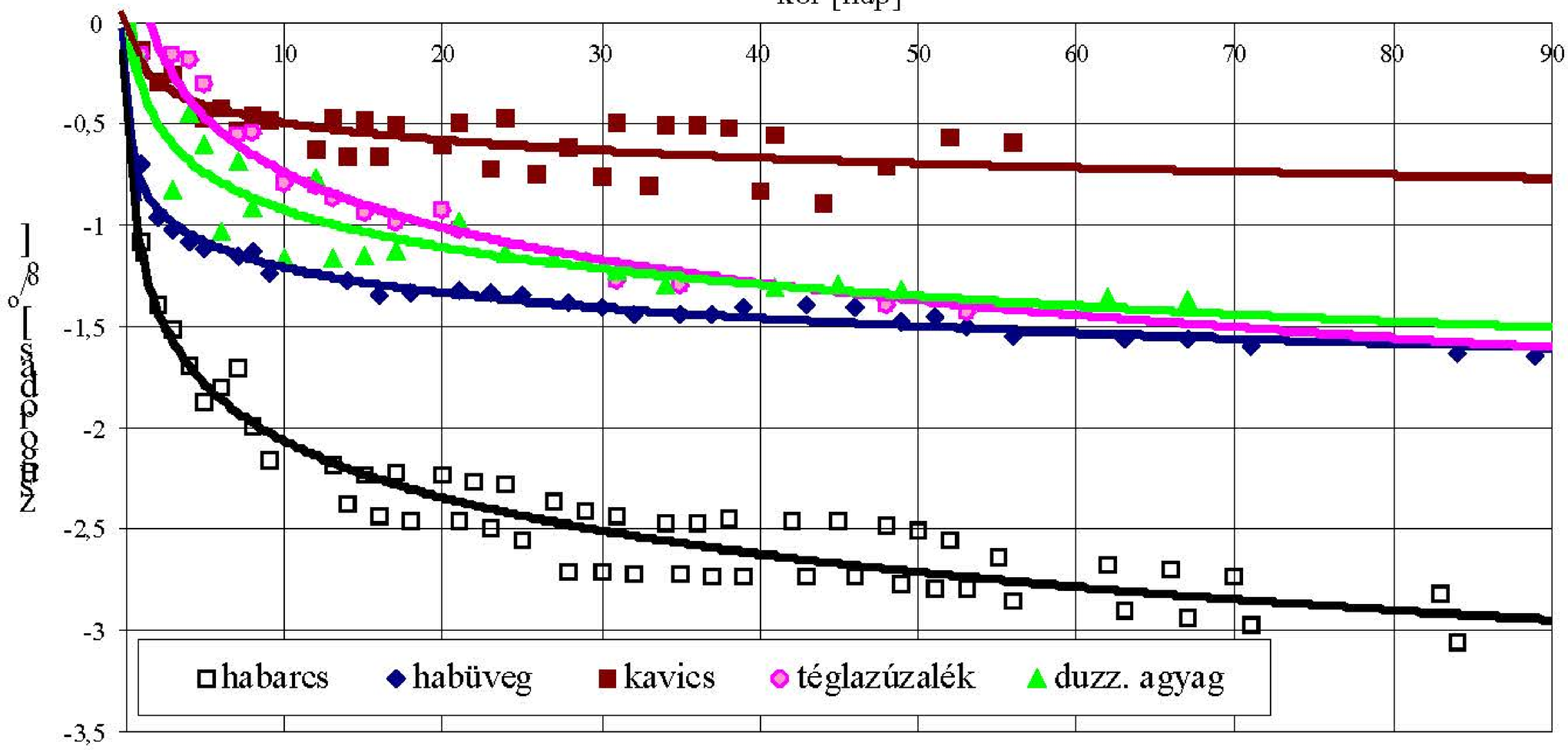
A különböző habüveg adalékanyagú betonok zsugorodás szempontjából hasonlóan viselkednek. A kísérleti eredményeket a *2.32. ábra* szemlélteti. A habüveg adalékanyagok különböző szemcse-testsűrűségének ellenére azonos összetételű habarcsban (1. jelű) (*2.3. táblázat*), azonos 47 V%-os adagolásnál a beton zsugorodása közel azonos: 1,6-1,8 ‰.

2.3. táblázat: Az 1. 2. és 3. jelű habarcs összetétele	**homok/ /cement tömeg-aránya**	**víz/ /cement tömeg-aránya**	**cement-tartalom a habarcsban [kg/m³]**	**cement-tartalom a betonban [kg/m³]**
1. jelű össze-tétel	1,25	0,35	868	380 - 555
2. jelű össze-tétel	2,0	0,43	638	338
3. jelű össze-tétel	3,0	0,55	494	262



2.32. ábra: Különböző habüveg adalékanyagos könnyűbetonok zsugorodása

Különböző adalékanyag típusokat vizsgálva jól látható (*2.33. ábra*), hogy mindegyik vizsgált könnyű adalékanyag (habüveg, duzzasztott agyagkavics, téglazúzalék) alkalmazása esetén közel azonos a zsugorodás, és ez mintegy kétszerese az azonos habarcs összetételű és adalékanyag tartalmú kvarckavics beton zsugorodásának. Ez a különbség az adalékanyagok merevségének különbségére vezethető vissza, minthogy ebben az esetben a péptartalom azonos volt. A különböző könnyű adalékanyagok alkalmazásakor a képlékeny zsugorodás eltérő, habüveg esetén a legnagyobb. A kezdeti zsugorodás annál kisebb, minél nagyobb az adalékanyag vízfelvétele, tehát a különböző kezdeti zsugorodásnak oka lehet, hogy a nagy vízfelvételű adalékanyag a keverés során a cementpép víztartalmának egy részét elszívja, és azt a szilárdulás során folyamatosan adja le, ezzel belülről nedvesen tartva a betont. A habüveg esetén a zsugorodás időbeli lefolyása (a görbe alakja) hasonló a kvarckavics betonéhoz, csak a mértéke nagyobb. Összehasonlításképpen a *2.33. ábrán* látható az adalékanyag nélküli habarcs zsugorodása is, ez nagyjából a könnyűbetonokon mért érték kétszeresére adódott, ami közelítően megfelel az adalékanyag-cementkő aránynak.

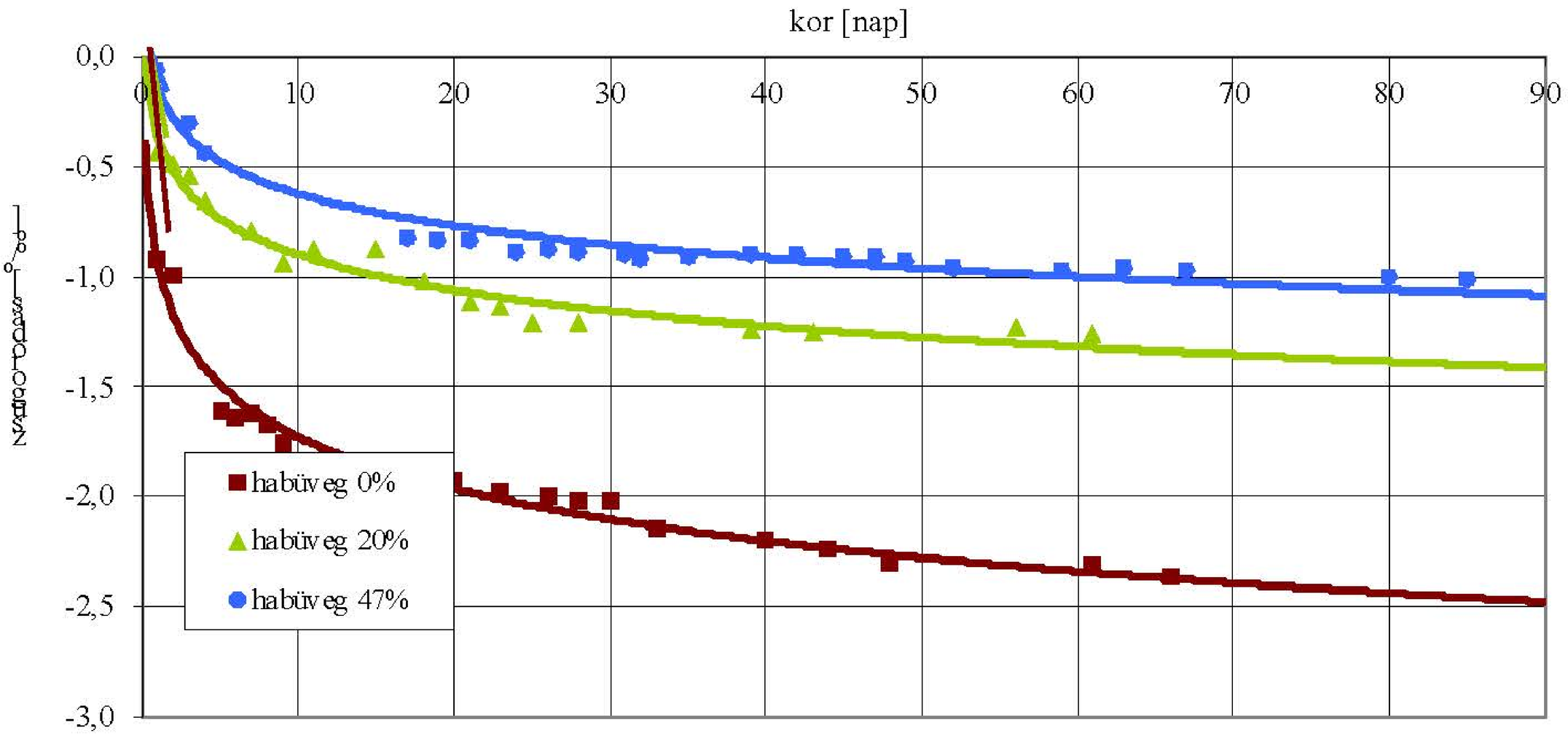


2.33. ábra: Különböző adalékanyagok hatása a könnyűbeton zsugorodásra

2.8.3. Az adalékanyag adagolás mértékének hatása

[*Nemes*, 2004], [*Nemes*, 2006]

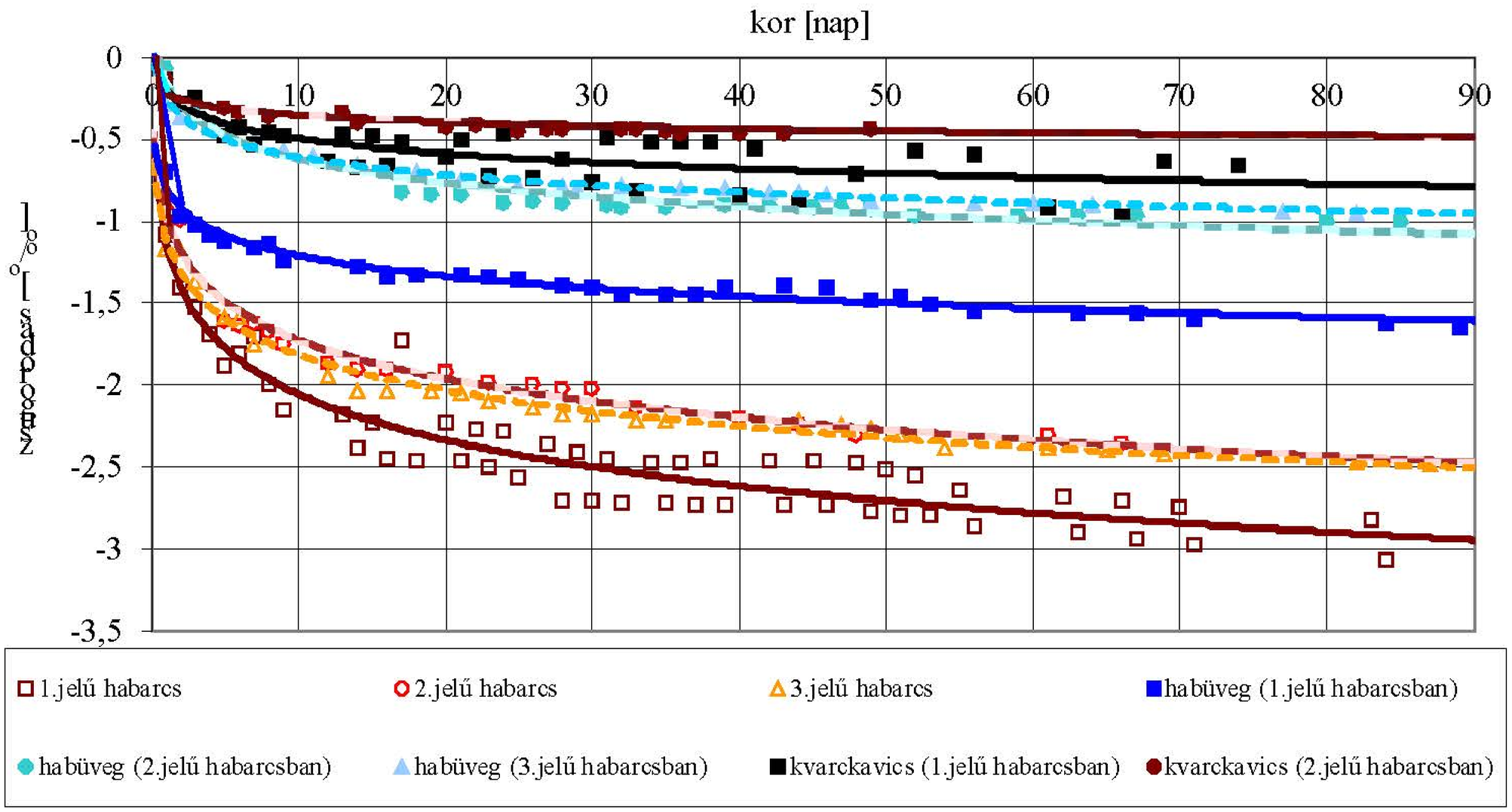
Ugyanazon adalékanyagnak kisebb adagolása mellett természetesen nagyobb zsugorodást kapunk, de a növekedés nem arányos az adalékanyag mennyiségének csökkentésével (*2.34. ábra*).



2.34. ábra: Adalékanyag adagolás mennyiségének hatása a zsugorodásra

2.8.4. A habarcs összetételének hatása [*Nemes*, 2004], [*Nemes*, 2006]

A cement és a víz-cement tényező ellentétes irányban történő változtatásának hatására hasonló mértékű zsugorodás játszódik le (2. és 3. jelű keverékek - (*2.3. táblázat*) (*2.35. ábra*). A cement és a víz adagolásának növelése egyaránt növeli a zsugorodást, így ebben az esetben a zsugorodásra gyakorolt együttes hatásuk közel azonos. Ez a jelenség minden vizsgált adalékanyagfajta esetén megegyezett. A legnagyobb cementtartalmú keverék esetén ~0,5 ‰-kel nagyobb zsugorodás jött létre, mint a másik két esetben. Ez a különbség ugyanekkora volt könnyűbeton esetén is, tehát arányaiban jobban nőtt a zsugorodás. Megállapítható, hogy a habüveg adalékanyagos könnyűbetonok zsugorodása – hasonlóan a közönséges betonokhoz – elsősorban a habarcs összetételétől függ, de a zsugorodás végértéke azonos habarcs alkalmazása esetén mintegy kétszerese a kvarckavics adalékanyagosénak.



2.35. ábra: A habarcsösszetétel hatása a zsugorodásra

2.8.5. Az utókezelés hatása [*Sárosi*, 2007]

Az utókezelés kritikus pontja a beton tervezett minőségének elérésében. A hagyományos utókezelési módok elhagyása vagy nem szakszerű elvégzése jelentősen rontja a beton szilárdságát és tartósságát.

Ha a kötéshez szükséges víz idő előtt távozik a betonból, akkor a szilárdság lecsökken, továbbá repedések keletkeznek. Ezért az újabb kutatások igyekeznek az utókezelést a beton receptúrájával megoldani, valamilyen speciális kiegészítő anyag hozzáadásával. A zsugorodásból származó repedések kialakulására jelentős hatással van az utókezelési mód, elsősorban a korai zsugorodási repedéseket érinti. A töppedést a felületről gyorsan elpárolgó víz okozza a még képlékeny betonban. A cementpép vagy bármely más anyag szuszpenziója a szabad felület felé párologva kezdi elveszíteni a vizét, majd a szemcsék lesüllyednek és a víz a felületi feszültség révén a kapillárisokból fölfelé szívódik és ott elpárolog. Az így keletkező repedések a 4 mm/m-t is elérhetik, a repedéstágasság 0,5-2,0 mm közötti, a mélységük elérheti a 10 cm-t. A hagyományos nedvesen tartási módok - mint a locsolás/permetezés, fóliatakarás – lehetőség van belső utókezelési módokra is. ilyen például a nagy vízfelvételű polimerek (SAP – Super Absorbent Polymers) frissbetonba való keverése. Ezek olyan poliakril-savak, amelyek a saját tömegüknél tízszer több vizet képesek felszívni és ezt lassan visszaadni, így a kötés során a beton belső rétegeiből a kötés során elvonásra került vizet pótolni tudják [*Wittmann,* 1982].

A Stuttgarti Egyetem Építőanyagok Tanszékén (Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen) locsolásos/permetezéses és az SAP alkalmazás módszerét hasonlították össze. nagy víz-cement tényezőjű és nagy finomrész tartalmú betonokon vékony lemez (8 cm-es) próbatesteken. Azt tapasztalták, hogy a polimer adagolás hatására a repedések átlagos szélessége csökkent, de a repedésszám és a repedések átlagos felülete növekedett. A polimerek a beton kivérzését megszüntették és ezzel főleg az első órai vízveszteséget csökkentették. Hőkiegyenlítés – a hidratációs hő elvezetése – szempontjából a polimerek hatása bizonyult a legjobbnak, mivel a beton teljes vastagságában egyenletesen fejtette ki hatását, szemben a permetezéssel vagy más nedvesen tartási módszerekkel, amik a középső rétegeket alig befolyásolják. A permetezése és az SAP-s módszer műszaki tartalma összességében közel azonos, bár a polimerekkel történő utókezelés annál előnyösebb, minél nagyobb a szerkezeti méret, különösen a vastagság.

2.9. Adalékanyagos könnyűbetonok zsugorodása

A tartószerkezeti könnyűbetonok alkalmazásában élenjáró Észak-Amerikában a könnyű adalékanyagot felhasználás előtt általában vízzel telítik, és ezzel… [*Throsten Faust*: Leichtbeton im Konstruktiven Ingenieurbau, 31, 44, 137, 138, 168 oldalak.]

IRODALOMJEGYZÉK

Adam, Th.: Ein modell zur Beschreiben der Hydratation von Beton in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt. Akadémiai doktori értekezés. Technische Universität Darmstadt, 2006.

Balázs Gy. – Borján J. – Cary Silva J. – Liptay A. – Zimonyi Gy. (1979), "A cement repedésérzékenysége" Tudományos közlemények, 1979 Budapest, HU ISSN 0324-3575

Balázs Gy.: Építőanyagok és kémia, Tankönyvkiadó, 1983.

Balázs Gy. – Csányi E. – Gombor P.: Az adalékszerek hatása a cement repedésérzékenységére, Építőanyag 54. évf. 2002. 4. szám

Brüll L., Komlos K. (1988), "Early shrinkage of hardening cement pastes" 1988, Evanston, USA, ISBN 0 471 92057 6

Eichler, W-R.:Microsilica in der Anwendung aus der sicht eines Baustoffchemikers. Microsilica in der modernen Betontechnologie. Konferencia kiadvány, Konstanz. pp. 71 – 78. Elkem GmbH., Allensbach, 1991.

Farkas György – Huszár Zsolt – Kovács Tamás – Szalai Kálmán: Betonszerkezetek méretezése az Eurocode alapján. Közúti hidak, épületek. Terc Kft. Budapest, 2006.

Fontana, P.: Einfluss der Mischungszusammensetzung auf die frühen autogenen Verformungen der Bindemittelmatrix von Hochleistungsbetonen. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb, Heft 570. Beuth Verlag GmbH., Berlin, 2007

Für Kovács I., – Seidl Á. (2004) "Üvegszálak alkalmazása a korai zsugorodás megakadályozására" hozzászólás a Szálerősítésű betonok a kutatástól az alkalmazásig c. konferencia Üvegszálak szekciójához 2004. november 19., Budapest

Józsa Zs. – Djember Cs. – Für Kovács I. – Seidl Á. (2005), "Use of Glass and Synthetic Fibres Preventing Early Age Cracking of Normal and Lightweight Concrete", Proc. 1st Central European Congress on Concrete Engineering, Grác, 2005, Ausztria pp.125-130.

Józsa Zs., Nemes R., Fenyvesi O., Lublóy É., Fischer N., Czuppon G.: „Könnyűbetonok tartóssága" - Betonszerkezetek tartóssága konferencia 2008 június 23. pp. 237-256. ISBN:978-963-420-954-6

Kausay T.: A beton zsugorodás, www.betonopus.hu, 2009

Kovács I. - Balázs Gy. L. (2004), "Structural performance of steel fibre reinforced concrete", Műszaki könyvkiadó, Budapest, 2004

König, G. – Viet Tue, N. – Zink, M.: Hochleistungsbeton. Bemessung, Herstellung und Anwendung. Ernst & Sohn Verlag GmbH. Berlin, 2001.

Lura, P. – Jensen, O. M.: Measuring Techniques for Autogenous Strain of Cement Paste, Materials & Structures Vol. 40, Nr. 4 / May, 2007 pp. 431-440. ISSN: 1359-5997 (Print) 1871-6873 (Online)

Nemes R. „Hulladékok felhasználásával készült könnyűbetonok zsugorodása" Anyagvizsgálók Lapja 2004. 1. szám pp. 6-7. ISBN 1215-8410

Nemes R.: Habüveg adalékanyagos könnyűbetonok, PhD értekezés, BME 2006

Nothnagel, R.:Hydratations- und Strukturmodell für Zementstein. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig. Heft 200. 2007.

Palotás L.: Fa – kő – fém – kötőanyagok. Mérnöki szerkezetek anyagtana 2. Akadémiai Kiadó. Budapest, 1979.

Powers, T. C. – Brownyard T. L.: Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. Journal of the American Concrete Institute, Proc. 43 (1947); Bulletin 22, Research Laboratories of the Portland Cement Association, Chicago, 1948.

Sárosi M.: Analyse der Materialeigenschaften der Betonmischung einer Großvolumigen Bodenplatte, insbesondere ihrer Risseigung. Diplomamunka, 2007

Wischers G. – Manns W.: Ursachen für das Entstehen von Rissen in jungem Beton, Betontechnologische Berichte 1973, Heft 4, pp.67-94

Wittmann F. H. (ed) (1982) "Fundamental Research on Creep and Shrinkage of Concrete" 1982, Hága, Hollandia, ISBN 90 247 2549 6

www.schleibinger.com 2009

Zement-Taschenbuch. 51. Ausgabe. vdz. Verein Deutscher Zementwerke e.V., Forschungsinstitut der Zementindustrie. Verlag Bau+Technik GmbH. Düsseldorf, 2008.

SZABVÁNYOK ÉS IRÁNYELVEK

MSZ EN 1992-1-1:2005Eurocode 2: Betonszerkezetek tervezése. 1-1. rész: Általános és az épületekre vonatkozó szabályok

MSZ 4798-1: 2004 Beton 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelőség, valamint az MSZ EN 206-1 alkalmazási feltételei Magyarországon 2004

DIN 1045-1:2008 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion

DAfStb Heft 561. Ultrahochfester Beton. Sachstandbericht. Beuth Verlag GmbH., Berlin, Wien, Zürich, 2008

Faserbeton Richtlinie 2002. Osztrák műszaki irányelv

Rugalmassági modulus

Anyag megnevezése	Rugalmassági modulus N/mm^2	Irodalmi forrás
ACÉL		
Betonacél, B 37 és B 52 minőségű (szakítószilárds.) Hőmérséklet [°C] esetén: 20 100 200 300 400	 210.000 205.000 193.000 185.000 175.000	*Palotás László*: Mérnöki szerkezetek anyagtana. 2. kötet. 1979. p. 370.
Melegen hengerelt betonacél	206.000	MSZ 15022-1:1986 Építmények teherhordó szerkezeteinek erőtani tervezése. 1. rész: Vasbeton szerkezetek
Feszítőhuzalok és pászmák	195.000	MSZ 15022-2:1986 Építmények teherhordó szerkezeteinek erőtani tervezése. 2. rész: Feszített vasbeton szerkezetek

ALUMÍNIUM		
Alumínium	70.000	*Palotás László*: Mérnöki szerkezetek anyagtana. 2. kötet. 1979. p. 432., 435.
BETON		
Beton, nyomási kezdeti rugalmassági modulus		MSZ 15022-1:1986 Építmények teherhordó szerkezeteinek erőtani tervezése. 1. rész: Vasbeton szerkezetek
C 10	24.900	
C 16	27.400	
C 20	28.800	
C 25	30.500	
C 30	31.900	
C 40	34.500	
C 55	37.800	
Beton, nyomási rugalmassági modulus		*Fenyves Hedvig – Kausay Tibor*: Előregyártott közönséges és feszített vasbeton tartók betonjának rugalmassági modulusa. Építőanyag. 1982. 3. szám. p. 86-98.
E_0 kezdeti	26.200 – 31.000	
E_b tehermentesítési	24.000 – 25.300	
E_D húr	21.800 – 25.700	
E_T érintő	16.300 – 20.200	

Anyag megnevezése	Rugalmassági modulus N/mm^2	Irodalmi forrás
MŰANYAG		
Polipropilén szál Fibrin Politon (magyar)	 < 18.000 6.000	Szálerősítésű betonok. A *fib* konferencia kiadványa. Budapest, 1999.
Poliakrilnitril szál	17.000 – 20.000	
Aramid (Poliaramid) szál	50.000 – 150.000	
NÖVÉNY		
Fa hajlító-húzási rugalmassági modulusa, rostokkal párhuzamos Hárs, nyár Erdei-, jegenye-, lucfenyő Tölgyfa Kőris, akác, vörösfenyő Nyír, bükk	 7.000 – 8.000 10.000 – 10.500 11.500 12.000 – 12.500 14.000 – 14.500	*Palotás László*: Mérnöki szerkezetek anyagtana. 2. kötet. 1979. p. 92.
Fa hajlító-húzási rugalmassági modulusa, rostokkal párhuzamos (nedvességtartalom függvényében)	5.555 (n=26 tömeg%) átszámítva: 7.111 (n=12 tömeg%)	Mérési eredmények egyike laboratóriumi gyakorlaton. (BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék)
Cellulóz szál	5.000 – 40.000	Szálerősítésű betonok. A *fib* konferencia kiadványa. Budapest, 1999.

ÜVEG		
E-üveg	72.000 – 80.000	Szálerősítésű betonok. A *fib* konferencia kiadványa. Budapest, 1999.
AR-üveg (alkáliáknak ellenálló üveg)	78.000 – 80.000	
ÁSVÁNY		
Azbeszt szál	164.000	Szálerősítésű betonok. A *fib* konferencia kiadványa. Budapest, 1999.
Szén szál (mesterséges)	150.000 – 300.000 illetve: 30.000 – 400.000	
Szilícium-karbid (SiC) szál	100.000 – 400.000	